

VESIHALLITUS—NATIONAL BOARD OF WATERS, FINLAND

Tiedotus
Report

228

RAIMO KÖRKKÖ
ERKKI LOUKOLA
TIMO MAIJALA

HAUTAPERÄN MAAPADON VARMUUDEN TARKISTUS

Sammandrag: Granskning av säkerheten hos Hautaperä damm

HELSINKI 1983

SISÄLLYS

1.	JOHDANTO	5
2.	SUUNNITTELU	5
2.1	Patolinjan tutkimukset	5
2.11	Patolinjan pohjasuhteet	6
2.2	Padon rakenne	6
3.	RAKENTAMINEN	10
3.1	Moreenirungon rakennustapa ja laatuvaatimukset	10
3.2	Työnaikainen tarkkailu ja valvonta	11
3.21	Valvontaorganisaatio	11
3.22	Padon ominaisuudet työn aikana suoritettujen tutkimusten perusteella	12
4.	PADON KÄYTTÄYTYMINEN RAKENTAMISEN JÄLKEEN	17
4.1	Sortumat kesällä 1976 ja padon vahvistaminen	17
4.2	Huokosvedenpaineen mittaukset padossa	18
4.3	Routamittaukset padossa	20
4.4	Suotovesimäärät	23
4.5	Vedenläpäisevyyskokeet padolla huokosvesiputkien avulla	23
4.51	Vedenläpäisevyyskokeissa käytetty menetelmä	23
4.52	Tulokset vedenläpäisevyyskokeista	25
5.	SUOTOVIRTAUSMÄÄRITYKSET ELEMENTTIMENETELMÄLLÄ	27
5.1	Virtausverkko ja tietokoneohjelma suotovirtauksen ratkaisemiseksi	27
5.2	Vedenläpäisevyysuhteisiin vaikuttavat tekijät	29
5.3	Tutkittu poikkileikkaus ja ratkaisuperiaate	30
5.4	Laskelmat järven vedenkorkeudella HW = 99,75	31
5.41	Reunaehdot	31
5.42	Vedenläpäisevyyskertoimien määritykset elementtimenetelmällä	32
5.5	Tulosten tarkastelu	35
5.51	Padon pohjaosa	35
5.52	Välisuodatin	39
5.53	Vedenläpäisevyyskertoimet	39
5.6	Yhteenveto vedenläpäisevyysmäärityksistä	42

6.	KOLMIAKSIAALISET PURISTUSKOKEET	43
6.1	Koemenetelmät	43
6.11	Laitteisto ja koemenetelmät	43
6.12	Takapaine	44
6.13	Näytteiden valmistus	45
6.14	Leikkaus	45
6.2	Koetulokset	46
6.21	Konsolidoitu nopea koe eli cu-koe	46
6.22	Avoin koe eli d-koe	48
6.23	Suljettu nopea koe eli u-koe	49
6.3	Kolmiaksiaalikokeiden virheet	52
6.4	Koetulosten käsittely	52
7.	VAKAVUUSLASKELMAT	60
8.	JOHTOPÄÄTÖKSET SUORITETUISTA SELVITYKSISTÄ	63
9.	TIIVISTELMÄ	64
	SAMMANDRAG	65
	KIRJALLISUUSLUETTELO	66

1. J O H D A N T O

Haapajärven kaupungissa sijaitseva Hautaperän maapato rakennettiin vuosina 1971-1976. Pato on tyypiltään homogeeninen moreenipato, jossa on pohjasuodatin salaojineen suotovesien poisjohtamiseksi. Sen suurin korkeus on 22 m ja pituus 3,6 km. Patoon liittyvä Hautaperän tekojärvi on pinta-alaltaan 7,6 km² ja tilavuudeltaan 48,2 milj. m³. Järven ensimmäinen täyttö tapahtui syksyllä 1975 ja talvella 1976.

Padossa todettiin kesällä 1976 voimakasta suotautumista, joka aiheutti useisiin kohtiin kuivan luiskan pinnalla padon alkuosalla kosteita läikkiä. Kuivan luiskan yläosassa (pl 10+20) tapahtui sortuma kesällä 1976 sattuneen rankkasateen jälkeen. Pato vahvistettiin tältä osin välittömästi. Myöhemmin pato vahvistettiin kauttaaltaan. Tässä tutkimuksessa on esitetty vesihallituksen teknillisen tutkimustoimiston suorittamat laskelmat ja selvitykset, jotka liittyvät vahvistusrakenteiden mitoittamiseen ja lopullisen patorakenteen vakavuuden tarkistukseen.

Tutkimuksen yhteydessä suoritetuissa suotovirtauslaskelmissa on käytetty Helsingin teknillisessä korkeakoulussa kehitettyjä ohjelmia. Maapatotyön valvontakokeiden tulokset on käsitelty teknillisessä tutkimustoimistossa kehitetyillä ohjelmilla. Vakavuuslaskelmat on suoritettu teknillisessä tutkimustoimistossa käytössä olevalla ohjelmistolla, jossa käytetään A.W. Bishopin kehittämiä laskenta-kaavoja.

2. S U U N N I T T E L U

2.1 PATOLINJAN TUTKIMUKSET

Maastotutkimukset mittauksineen on tehty pääasiassa Pohjanmaan jokisuunnittelutoimiston toimesta. Tutkimuksia on täydennetty suunnittelijana toimineen Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen geotekniikan laboratorion toimesta. VTT:n tutkimukset ovat käsittäneet siipikairauksia ja häiriintymättömien näytteiden oton sekä näytteiden laboratoriotutkimukset.

Maastotutkimusten rungon patolinjalla on muodostanut koekuoppien kaivu. Koekuopista on tutkittu silmämääräisesti maaperän rakenne ja otettu näytteitä, joista on määritetty laboratoriossa rakeisuus, vesipitoisuus ja vedenläpäisevyys. Tutkimusten yhteydessä on otettu näytteitä myös superheijari- ja pienoismäntäkairoilla. Painokairauksia on tehty pehmeikköosuuksilla 20 m välein. Pehmeiköillä on vakavuuslaskelmia varten valituissa poikkileikkauksissa suoritettu siipikairauksia ja otettu häiriintymättömiä näytteitä, joista on tutkittu indeksi- ja lujuusominaisuudet sekä painumaominaisuudet. Porakone- ja kallionäytekairauksia vesimenekkimittauksineen on suoritettu kalliopinnan syvyyden, kallion laadun ja vedenläpäisevyyden selvittämiseksi. Pohjavedenpinnan korkeus ja sen vaihtelu on mitattu maahan upotetuista putkista.

2.11 Patolinjan pohjasuhteet

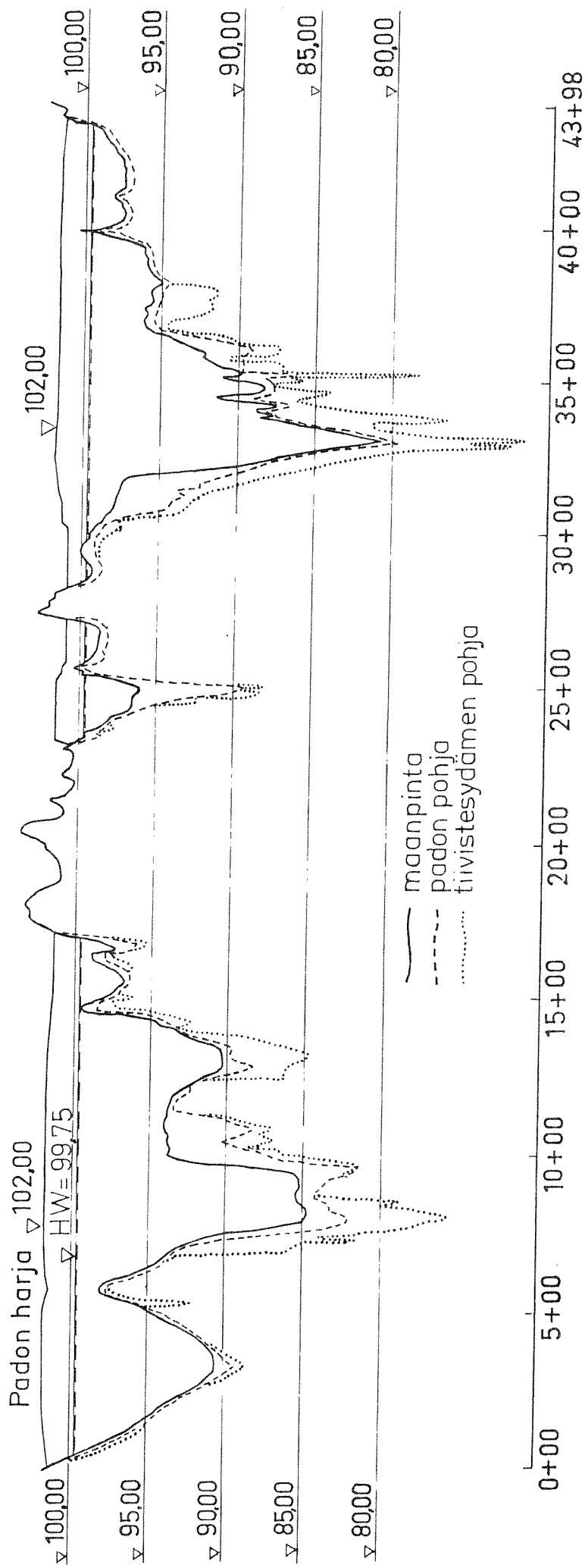
Pehmeikköä patolinjalla on noin 300 m. Pienehköjä kallioesiintymiä on muutamia ja lisäksi osittain rikkonainen ja rapautunut kallio on lähellä maanpintaa muutaman sadan metrin matkalla. Pääosalla 3,6 km pituisesta padosta esiintyy moreeni, jota peittävät pääosin kuivakuori tai lajittuneet kerrokset ja vähäisessä määrin turve- ja pehmeähköt savi- ja silttikerrokset.

Laboratoriossa tehtyjen kokeiden perusteella patolinjalla esiintyvien moreenien vedenläpäisevyys on suuruusluokkaa $k = 10^{-5,5} - 10^{-8,0}$ m/s.

2.2 PADON RAKENNE

Kuvassa 1 on padon pituusleikkaus, jossa padon ja tiivistesydämen pohjatasot ovat rakennustyön aikana määräytyneillä tasoilla. Kuvassa 2 on padon suunnitelman mukainen poikkileikkaus paalulla 8+40 (tyyppi paaluvälillä 7+80 - 9+20).

Moreenialueiden koekuopista otetuista näytteistä on tutkittu laboratoriossa rakeisuus, vesipitoisuus, maksimikuivatilavuuspaino, optimivesipitoisuus ja vedenläpäisevyys. Lisäksi on tutkittu vesi-



Kuva 1. Hautaperän maapadon pituusleikkaus. Padon harja, padon ja tiivistesydamen pohjat ovat toteutuneilla tasoilla.

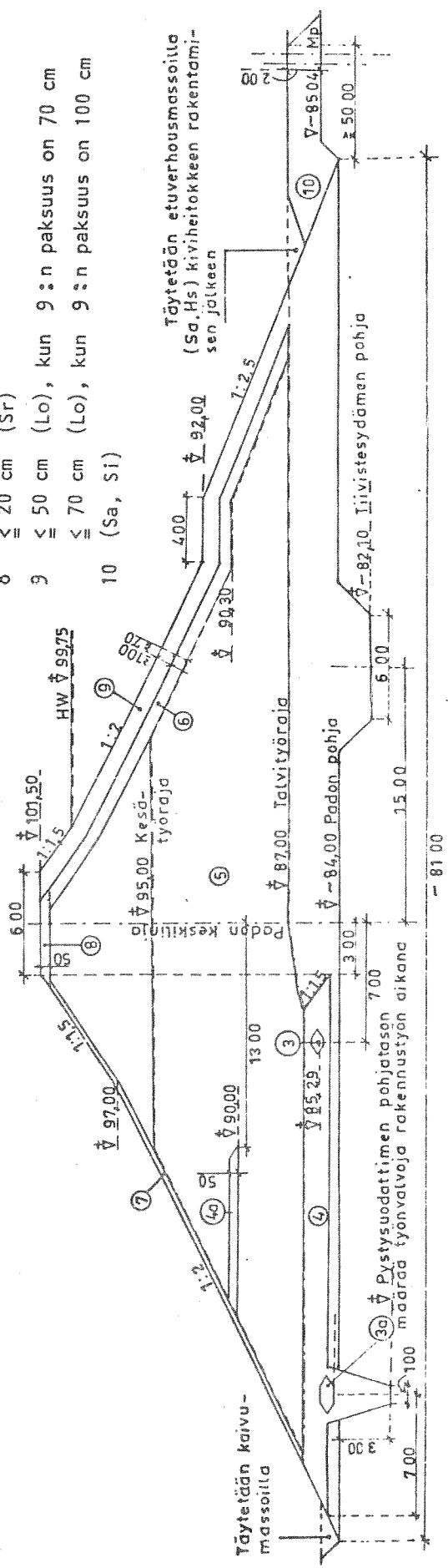
Vyöhykkeiden maksimi- ja minimiraekoot (maalaji)

- 3 ≤ 1 cm (Sr, kts. vyöhyke 4)
- 3a 5-20 cm (Ki)
- 4 ≤ 20 cm (Sr)
- 4a ≤ 20 cm (Sr, kuten vyöhyke 4)
- 5 ≤ 20 cm (Mr), tiivistesydämen upotuksessa
- ≤ 0,5 x tiivistettävän kerroksen paksuus, patorungossa
- 6 ≤ 20 cm (Sr)
- 7 ≤ 10 cm (Sr)
- 8 ≤ 20 cm (Sr)
- 9 ≤ 50 cm (Lo), kun 9:n paksuus on 70 cm
- ≤ 70 cm (Lo), kun 9:n paksuus on 100 cm
- 10 (Sa, Si)

PL 8+40; PL 7+80 - 9+20

Vyöhykkeet:

- 3 Muoviputkisalaojan suodatin
- 3a Kivisalaoja
- 4 Pohjasuodatin
- 4a Välisuodatin
- 5 Moreenirunko
- 6 Märän luiskan suodatin
- 7 Kuivan luiskan verhous
- 8 Padon harjan verhous
- 9 Märän luiskan kiviheitoke
- 10 Etuverhous



Kuva 2. Hautaperän maapadon suunniteltu poikkileikkaus paalulla 8+40. Tyyppi paaluvälillä 7+80 - 9+20. Rakeisuuksien ohjealueet kuvassa 3.

pitoisuus juoksurajalla sekä painumis- ja lujuusominaisuudet. Lohkareisuus on arvioitu koekuoppien kaivun yhteydessä.

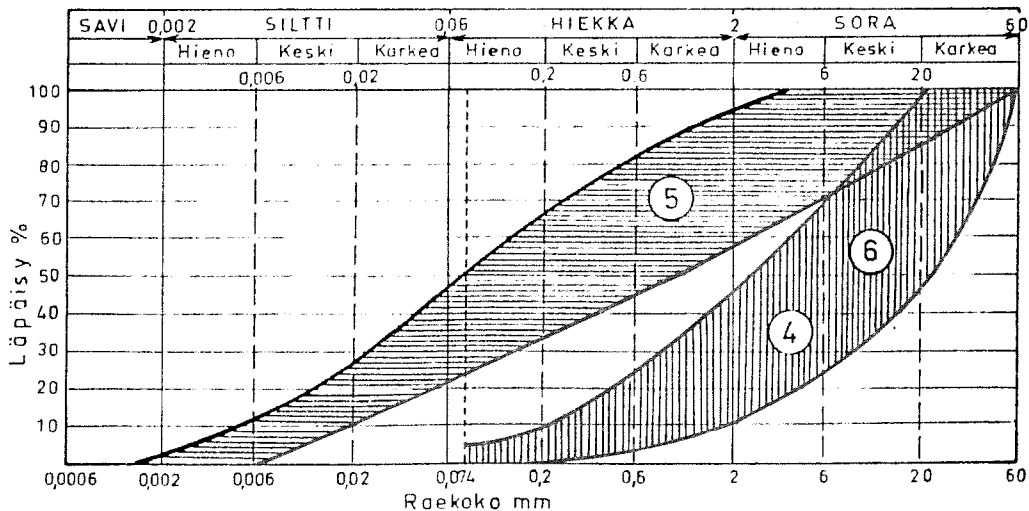
Tutkimusten perusteella on valittu moreenin ottoalueiksi Hautakankaan, Palokankaan ja Naapurikankaan alueet, joiden moreeni on suhteistunutta hiekkamoreenia.

Taulukossa 1 on esitetty moreenista tehtyjen laboratoriotutkimusten (TVH, VTT) vaihtelurajat ja keskiarvot.

Padon rakennusmateriaaliksi soveltuvan moreenin rakeisuusvyöhyke on esitetty kuvassa 3.

Taulukko 1. Moreeninottoalueiden tutkimustulosten (TVH) vaihtelurajat ja keskiarvot. Suluissa VTT:n tekemien tutkimusten tulokset.

Maanottoalue	Hautakangas	Palokangas	Naapurikangas	Hevoskangas
Lohkareisuus				
200-400 mm, arvioitu %	<20	<20	<20	<20
Vesipitoisuus, w %	2,7-9,0	7,8-12,7	6,7-13,6	4,8-10,1
" keskiarvo, w %	5,3	(7,3-8,5) 10,1 (8,0)	(6,2-8,6) 9,0 (7,6)	(7,2-7,8) 7,9 (7,4)
Maksimikuivatilavuuspaino	20,2-21,3	19,7-21,2	20,1-22,8	20,3-22,7
$\gamma_d \text{ max}$ kN/m ³	-	(20,8)	(21,2)	(21,4)
" keskiarvo	20,8	20,7 (20,8)	21,3 (21,2)	21,5 (21,4)
Optimivesipitoisuus	6,6-7,8	5,0-10,6	7,0-9,0	5,7-7,8
w_{opt} %	-	(7,8)	(7,0)	(7,2)
" keskiarvo	7,4	8,5	7,8	7,0
Vedenläpäisevyys k, m/s	$10^{-6,07}$ - $10^{-6,58}$	$10^{-6,72}$ - $10^{-7,62}$	$10^{-6,22}$ - $10^{-8,07}$	$10^{-6,22}$ - $10^{-8,61}$



Kuva 3. Vyöhykkeiden rakeisuuden ohjealueet. Moreenirunko (5), suodatin-sora (4,6).

Moreenille suoritettujen maasto- ja laboratoriotutkimusten (TVH, VTT) perusteella on padon vakavuuslaskelmissa käytetty taulukon 2 mukaisia leikkauslujuusparametrien ja tilavuuspainon arvoja.

Taulukko 2. Padon vakavuuslaskelmissa käytetyt leikkauslujuusparametrien ja tilavuuspainon arvot

Suunnittelutilanne	Märkätila- vuuspaino γ_m (kN/m ³)	Kitka- kulma ϕ' (°)	Koheesio c' (kN/m ²)
1. Rakennusaikana	23	39	10
2. Nopea vedenpinnan laskeutuminen	23	41	15
3. Jatkuva suototila	23	41	15

Kitkakulmat 39° ja 41° vastaavat tiiviysasteita 91 ja 95 %.

Suotovirtauslaskelmissa (HW=99,75) on käytetty paalulla 8+20 vedenläpäisykertoimien arvoja $k = 10^{-7}$ m/s patomoreenille ja $k = 10^{-6,5}$ m/s maapohjalle. Padon läpi suotava vesimäärä on tällöin 0,8 ml/s patometriä kohti ja padon alta suotava vesimäärä 0,7 ml/s eli yhteensä 1,5 ml/s patometriä kohti.

Paalulla 33+10, jossa padon maanpinnasta mitattu korkeus on suurin eli n. 22 m, on käytetty vedenläpäisevyyskertoimien arvoja $k = 10^{-7}$ m/s patomoreenille ja $k = 10^{-6,0}$ m/s maapohjalle. Padon läpi suotava vesimäärä on tällöin 1,2 ml/s ja padon alta 1,5 ml/s patometriä kohti eli yhteensä 2,7 ml/s patometriä kohti.

Suodatinmateriaalista on VTT:n laboratoriossa tutkituista näytteistä määritetty seuraavat arvot: rakeisuus, vesipitoisuus $w = 3,6-4,2$ %, maksimikuivatilavuuspaino $\gamma_{dmaks} = 20-21$ kN/m³, optimivesipitoisuus noin 6 % ja vedenläpäisevyys $k = 10^{-4,8} - 10^{-5,3}$ m/s. Suodatinmateriaaliksi soveltuvan soran rakeisuuden ohjealue on kuvassa 3.

3. RAKENTAMINEN

3.1 MOREENIRUNGON RAKENNUSTAPA JA LAATUVAATIMUKSET

Moreenirunko rakennettiin levittämällä patoon kuljetettu moreeni puskutraktorilla vaakasuoraksi kerrokseksi, joka tiivistettiin

käyttäen vedettävää täryjyrää. Veden poisjohtamiseksi pidettiin työn aikana moreenin pinta sivuille viettävänä. Sileiden kosketuspintojen välttämiseksi kerrosten välillä täryjyrän jäljeltä sileäksi jäänyt pinta karhennettiin joko ajamalla telapuskutraktorilla kohtisuoraan patolinjaa vastaan tai työntämällä puskuterällä sileä pintakerros rikki.

Ennen moreenirungon rakentamisen aloittamista suoritettiin kenttäkoe, jolla selvitettiin yhdellä kertaa tiivistettävän kerroksen paksuus ja ajokertojen lukumäärä tiivistämissä käytetyille koneille.

Tiivistyskoneena moreenirungon rakentamisessa käytettiin hinattavaa täryjyrää Lokomo AT 75, jonka paino on noin 8 tonnia. Ajonopeutena käytettiin noin 2 km/h. Kerrosvahvuus tiivistämättömänä oli 0,7-0,8 m ja ajokertojen lukumäärä 8. Täryjyrän kierrosnopeus oli 1 500 kierr./min.

Tiiviysastevaatimuksena moreenirungon alaosassa talvityörajan (kuva 2) alapuolella oli 90 % ja talvityörajan yläpuolella 95 % parannetulla Proctor-kokeella saadusta maksimitiiviydestä. Vedenläpäisevyyden vaatimuksena oli moreenirungolle $k < 10^{-7}$ m/s ja padon maapohjalle $k < 10^{-6,5}$ m/s. Rakeisuuden ohjealueet ovat kuvas-
sa 3. Moreenissa piti olla hienoaainespitoisuuden vähintään 15 %. Tiivistystyö oli pyrittävä suorittamaan mahdollisimman lähellä Proctor-kokeen mukaista optimivesipitoisuutta.

3.2 TYÖNAIKAINEN TARKKAILU JA VALVONTA

3.21 Valvontaorganisaatio

Rakennustyön valvontaan osallistui työmaalla työnjohdon lisäksi kenttälaboratorio. Valvontakokeet suoritettiin vesihallituksen teknillisen tutkimustoimiston ohjeiden mukaan. Koetulokset lähetettiin työnjohdolle, Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen geotekniikan laboratorioon sekä vesihallituksen teknilliseen tutkimustoimistoon.

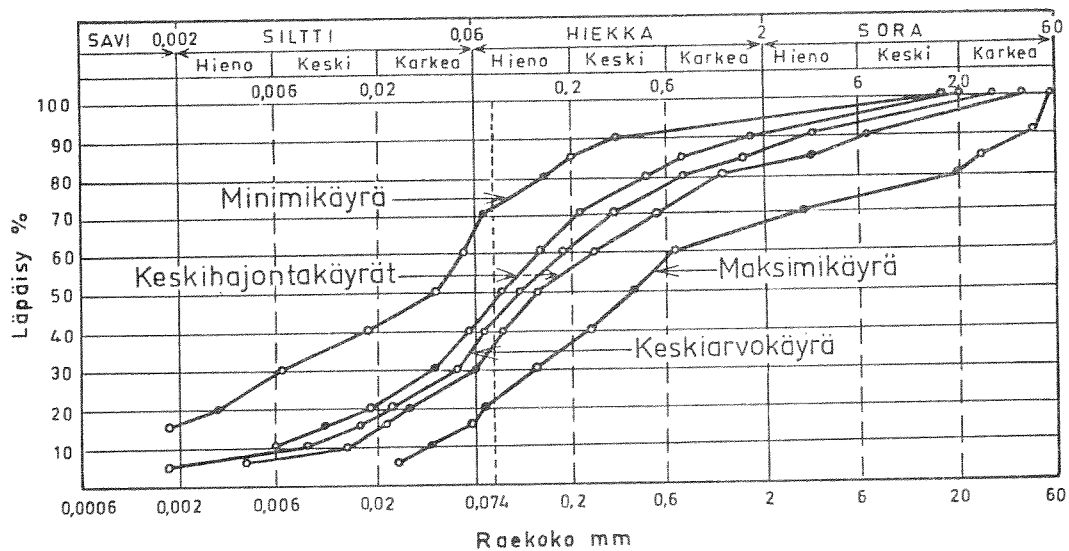
3.22 Padon ominaisuudet työn aikana suoritettujen tutkimusten perusteella

Laadunvalvontatulokset käsiteltiin teknillisessä tutkimustoimistossa ns. maapatotyön valvontarekisterin avulla (Loukola 1979). Rekisteriin kerättiin kenttäkokeiden suorituspisteiden asema, padon pinnan asema kokeen suoritusajana, päivämäärä sekä seuraavat mittaustulokset: rakeisuus, hienoainespitoisuus, tilavuuspaino, kuivatilavuuspaino, maksimikuivatilavuuspaino, vesipitoisuus, optimivesipitoisuus, vedenläpäisevyys padolla ja laboratoriossa mitattuna, tiiviysaste sekä ajokertojen lukumäärä ennen ja jälkeen koetta. Huomautuksina on rekisteriin kerätty tavallisimmat mittausten virhelähteet. Mittaustulokset on ryhmitelty padon pituus- ja korkeussuunnissa kronologiseen järjestykseen ns. tarkkailuprofiiliksi. Taulukossa 3 on esitetty padon tarkkailuprofiili paaluvälillä 8+30 - 8+80 moreenirungon osalta.

Patotyön laatutason arvioimiseksi on laskettu eri ominaisuuksien vaihtelu kunkin patorakenteen kohdalta. Kuvassa 4 on esitetty moreenirungon rakeisuuden vaihtelu keskiarvo- ja ääriarvokäyrinä sekä keskihajontaa esittävinä käyrinä. Keskiarvot ja ääriarvot sekä hajonta on laskettu raekokomitoista logaritmisesti. Moreenirungon keskimääräiseksi rakeisuussuhteeksi D_{60}/D_{10} on saatu 20,9 ja keskimääräiseksi käyryysluvuksi $D_{30}^2/(D_{60} \times D_{10}) = 1,1$. Keskimääräinen raekoko D_{50} on 0,12 mm. Maalaji on pääasiassa hiekka-moreenia. Minimikäyrä osoittaa hienoimpien näytteiden olleen silttimoreenia.

Taulukko 3. Hautaperän maapadon moreenirungon tarkkailuprofiili
paaluvälillä 8+30-8+80.

Paa- lu- n:o	Maan- pinnan korkeus	Näyte- syvyys	Etäisyys keski- linjasta		Kuiva- tila- vuus- paino (γ_d) kN/m ³	Tiivi- ysaste (D)	Vesi- pitoi- suus (W)	Vesip. optimi- vesipi- toisuus (w_{opt})	Vedenläpäise- vyudet (k) kenttä- labora- torio	Maa- laji (8= HkMr)	Ilmo- aines- pitoi- suus	Jyräys ennen kokeen	Jälkeen	Päivämäärä
	m	m	m			%	%	%	10 ^{-x}	m/s	%			
8.30	88.84	0.15	vas	11.00	21.8	102.8	8.7	+ 2.3	7.95			8		72. 6.29
8.30	88.84	0.15	vas	9.00	20.3	95.7	8.2	+ 1.8	8.18	8	46	4		72. 6.29
8.30	88.84	0.15	vas	8.00	19.4	91.5	8.9	+ 2.5	8.17			6		72. 6.29
8.30	88.84	0.65	vas	11.00	20.6	97.2	9.0	+ 2.6				8		72. 6.29
8.30	88.84	0.65	vas	9.00	19.5	91.9	9.4	+ 3.0				4		72. 6.29
8.30	88.84	0.65	vas	8.00	19.1	90.1	9.5	+ 3.1				6		72. 6.29
8.35	88.06	0.50	vas	6.00	19.8	93.0	9.1	+ 2.4	6.89	8	47	4		72. 6.16
8.35	81.73	0.00	oik	17.00	19.1	91.0	10.8	+ 3.7	8.11	8	41			72. 3.22
8.40	99.93	0.10	oik	0.00	20.5	97.2	3.3	- 3.0	7.38	8	39	8		75. 8.21
8.40	97.10	0.10	vas	6.00	19.4	91.9	5.8	- 0.2	7.69	8	41	8		75. 7.30
8.40	92.54	0.00	oik	5.00	17.4	83.0	8.2		8.25	8	45	9		72. 8.11
8.40	93.50	1.00	vas	9.00	20.6	95.2	8.2			8.61	8	47	9	72. 8.30
8.40	93.50	2.00	vas	4.00	18.3	85.9	8.0	+ 1.4	8.62	8	42	9		72. 8.17
8.40	90.30	1.00	oik	19.00	20.5	101.5	7.7		8.37	8	45	7		72. 7.13
8.40	88.97	0.30	oik	17.00	21.1	98.6	8.5		8.08	8	43	7		72. 6.20
8.40	89.40	1.50	vas	25.00	20.5	104.4	9.6		8.68	8	43	7		72. 7.11
8.40	84.20	0.00	vas	20.00	18.8	86.6	10.7	+ 4.7	8.60	8	38			72. 1.26
8.40	83.60	0.00	vas	10.00	20.6	94.9	8.2	+ 2.3	8.40	8	39			72. 1.19
8.45	94.30	1.10	vas	9.50	21.3	100.0	7.4		7.60	8	32	9		72. 9. 1
8.45	88.06	0.50	vas	14.00	20.6	96.3	8.4	+ 1.7	8.13	8	47	4		72. 6.16
8.60	100.15	0.10	oik	0.00	19.7	96.1	8.3	+ 1.0	8.58	8	30	8		75. 8.18
8.60	93.30	1.00	vas	11.00	19.7	92.8	9.3		8.187	8	47	9		72. 8. 8
8.60	94.30	2.00	oik	9.00	21.8	103.8	9.2	+ 2.0	8.17	8	59	9		72. 8.18
8.60	93.14	1.00	oik	11.00	19.7	92.5	7.6	+ 1.0	8.37	8	42	9		72. 8. 7
8.60	92.20	1.00	oik	14.00	16.2	80.1	9.3	+ 2.5	8.64	8	57	7		72. 2.28
8.60	92.15	1.00	vas	7.00	19.7	91.2	8.3	+ 1.9	7.96	8	47	9		72. 8. 4
8.60	91.30	1.00	oik	13.00	21.2	101.4	6.9		8.54	8	46	7		72. 7.17
8.60	90.50	0.50	vas	14.00	18.8	89.1	7.9		8.08	8	42	7		72. 7.20
8.60	90.90	1.10	oik	3.00	20.9	99.2	7.5		8.12	8	45	7		72. 7.11
8.60	90.05	1.00	oik	13.00	20.1	94.2	8.0		8.09	8	44	7		72. 6.27
8.60	90.20	1.30	oik	2.00	20.8	99.1	6.9		8.43	8	41	7		72. 7. 4
8.60	90.00	1.50	vas	15.00	20.8	102.2	7.5		9.02	8	47	7		72. 7.18
8.60	89.30	1.50	vas	26.00	18.5	94.4	11.2	+ 2.8	7.65	8	56	7		72. 7.11
8.60	87.42	0.20	vas	4.00	19.3	90.6	8.2	+ 1.6	7.00	8	45	5		72. 6. 6
8.60	87.20	0.20	vas	8.00	20.6	96.7								72. 6. 8
8.60	87.05	0.20	vas	16.00	21.0	98.6	9.4		8.22	8	43	6		72. 6.12
8.60	86.80	0.00	oik	3.00	20.4	95.8	10.0	+ 2.8	8.16	8	47			72. 4. 5
8.60	87.70	1.10	vas	24.00	20.9	93.9	6.6		8.73	8	48	7		72. 7. 5
8.60	86.70	0.20	oik	32.00	19.9	94.3	7.9	+ 1.5	8.07	8	43	5		72. 6. 7
8.75	94.30	1.10	oik	4.00	21.3	100.0	7.7	+ 0.3	8.00	8	36	9		72. 9. 1
8.80	97.80	0.10	vas	7.00	20.3	93.1	3.7	- 2.2	7.73	8	44	8		75. 7.31
8.80	93.70	0.00	oik	14.80	19.3	88.3	9.1					6		72. 9.15
8.80	92.67	0.00	vas	5.00	17.7	84.2	9.5		7.76	8	44	9		72. 8.11
8.80	93.50	2.10	vas	9.00	19.7	92.6	5.6			8.09	8	44	9	72. 8.17
8.80	89.80	0.70	oik	21.00	20.0	95.7	10.4		7.72	8	44	7		72. 6.30
8.80	88.52	0.20	oik	6.00	21.3	99.5	9.5		8.14	8	47	6		72. 6.14
8.80	87.70	0.20	oik	11.00	19.0	89.2	8.9	+ 3.2	8.08	8	45			72. 6. 8
8.80	87.16	0.20	vas	20.00	20.9	98.4	9.0		8.05	8	44	7		72. 6.22
8.80	85.20	0.00	oik	2.00	20.3	94.4	7.4	+ 0.0	7.87	8	44			72. 3.23
8.80	84.30	0.00	vas	20.00	17.8	82.8	8.6	+ 2.3	8.20	8	39			72. 2. 3



Kuva 4. Hautaperän padon moreenirungon rakeisuuskäyrät.

Eri ominaisuuksien vaihtelu on selvitetty määrittämällä havaintotuloksista frekvenssikäyrät sekä keskiarvot ja hajonnat. Moreenirungon vesipitoisuuden, optimivesipitoisuuden, tiiviysasteen ja vedenläpäisevyyden osalta on tulokset esitetty kuvissa 5-9. Moreenirungon materiaali on ollut 1,64 prosenttiyksikköä optimivesipitoisuutta kosteampaa. Tiiviysasteen keskiarvo on 93,08 prosenttiyksikköä ja hajonta 5,76 prosenttiyksikköä. Moreenirunko ei täten suurelta osin täytä suunnitelmassa asetettuja tiiviysastevaatimuksia. Vedenläpäisevyys on määritetty sekä kenttäkokeilla että laboratoriossa. Kenttäkokeilla on logaritmiseksi keskiarvoksi saatu $10^{-7,72}$ m/s ja negatiivisen potenssin hajonnaksi 0,64. Laboratoriokokeista on vastaaviksi arvoiksi saatu $10^{-7,96}$ m/s ja 0,43. Pienimmän ja suurimman läpäisevyyden suhde on noin 100. Hajonnan etäisyyteen keskiarvosta sen eri puolille sijoittuvien määritysten suhde on yli 10. Vedenläpäisevyyden vaihtelua yksittäisessä poikkileikkauksessa on käsitelty jäljempänä kappaleissa 4 ja 5.

SUHTEELLINEN FREKVENSSI PYLVASDIAGRAMMINA

* = 2 % aineistosta

VESIPITOISUUS %

3,0 - 3,9	
4,0 - 4,9	*
5,0 - 5,9	***
6,0 - 6,9	*****
7,0 - 7,9	*****
8,0 - 8,9	*****
9,0 - 9,9	*****
10,0 - 10,9	***
11,0 - 11,9	*
12,0 - 12,9	*
13,0 - 13,9	

lukumäärä = 895

keskiarvo = 8,15

hajonta = 1,72

Kuva 5. Hautaperän padon moreenirungon vesipitoisuus.

SUHTEELLINEN FREKVENSSI PYLVASDIAGRAMMINA

* = 2 % aineistosta

OPTIMIVESIPITOISUUS %

3,0 - 3,9	
4,0 - 4,9	
5,0 - 5,9	*****
6,0 - 6,9	*****
7,0 - 7,9	*****
8,0 - 8,9	*
9,0 - 9,9	
10,0 - 10,9	
11,0 - 11,9	
12,0 - 12,9	
13,0 - 13,9	

lukumäärä = 375

keskiarvo = 6,51

hajonta = 0,56

Kuva 6. Hautaperän padon moreenirungon parannetun Proctor-kokeen mukainen optimivesipitoisuus.

SUHTEELLINEN FREKVENSSI PYLVASDIAGRAMMINA

* = 2 % aineistosta

VEDENLÄPÄISEVYYS KENTTÄKOKEILLA 10^{-X} m/s

6,40 - 6,59	
6,60 - 6,79	*
6,80 - 6,99	**
7,00 - 7,19	**
7,20 - 7,39	****
7,40 - 7,59	*****
7,60 - 7,79	*****
7,80 - 7,99	*****
8,00 - 8,19	*****
8,20 - 8,39	****
8,40 - 8,59	*
8,60 - 8,79	*
8,80 - 8,99	

lukumäärä = 682

keskiarvo = 7,72

hajonta = 0,64

Kuva 7. Hautaperän padon moreenirungon vedenläpäisevyys kenttäkokeilla.

SUHTEELLINEN FREKVENSSI PYLVASDIAGRAMMINA

* = 2 % aineistosta

VEDENLÄPÄISEVYYS LABORATORIOKOEILLA 10^{-X} m/s

6,40 - 6,59	
6,60 - 6,79	
6,80 - 6,99	
7,00 - 7,19	**
7,20 - 7,39	***
7,40 - 7,59	****
7,60 - 7,79	*****
7,80 - 7,99	*****
8,00 - 8,19	*****
8,20 - 8,39	*****
8,40 - 8,59	***
8,60 - 8,79	***
8,80 - 8,99	**
9,00 - 9,19	

lukumäärä = 158

keskiarvo = 7,96

hajonta = 0,43

Kuva 8. Hautaperän padon moreenirungon vedenläpäisevyys laboratoriokokeilla.

SUHTEELLINEN FREKVENSSI PYLVASDIAGRAMMINA

* = 2 % aineistosta

TIIVIYSASTE %

78,0 - 79,3	
79,4 - 80,7	
80,8 - 82,1	
82,2 - 83,5	*
83,6 - 84,9	*
85,0 - 86,3	**
86,4 - 87,7	**
87,8 - 89,1	***
89,2 - 90,5	****
90,6 - 91,9	*****
92,0 - 93,3	*****
93,4 - 94,7	*****
94,8 - 96,1	*****
96,2 - 97,5	*****
97,6 - 98,9	***
99,0 - 100,3	**
100,4 - 101,7	*
101,8 - 103,1	*
103,2 - 104,5	
104,6 - 105,9	

lukumäärä = 846

keskiarvo = 93,08

hajonta = 5,76

Kuva 9. Hautaperän padon moreenirungon tiiviysaste.

4. PADON KÄYTTÄYTYMINEN RAKENTAMISEN JÄLKEEN

4.1 SORTUMAT KESÄLLÄ 1976 JA PADON VAHVISTAMINEN

Hautaperänjärveä täytettiin syksyllä 1975 ja talvella 1976 ensimmäistä kertaa vedenkorkeuden ollessa 5.1.1976 tasolla 97,70, josta järvi tyhjennettiin talven ja kevään aikana tasolle 91,00 15.4. mennessä, minkä jälkeen se täytettiin tulvavesistä. Järven ylin vedenkorkeus on $N_{43} + 99,50$ m, johon sallitaan enintään 14 vuorokautta kestävät 25 cm poikkeamat. Järvi oli HW-tasossa ensimmäistä kertaa 18.5., jolloin vedenkorkeus oli 99,53. Tämän jälkeen vesipinta vaihteli 18.5. - 23.6. välillä 99,29 - 99,60 ollen 23.6. tasolla 99,31. Tämän jälkeen vedenkorkeus vaihteli tasoilla 99,03 - 99,18 ollen sortumispäivänä 16.7.-76 tasolla 99,03.

Järven täyttövaiheessa vedenkorkeus nousi useissa havaintoputkissa padon taustalla maanpinnan yläpuolelle, minkä seurauksena tehtiin painopenkereitä em. kohdille loppuvuonna 1975 ja keväällä 1976.

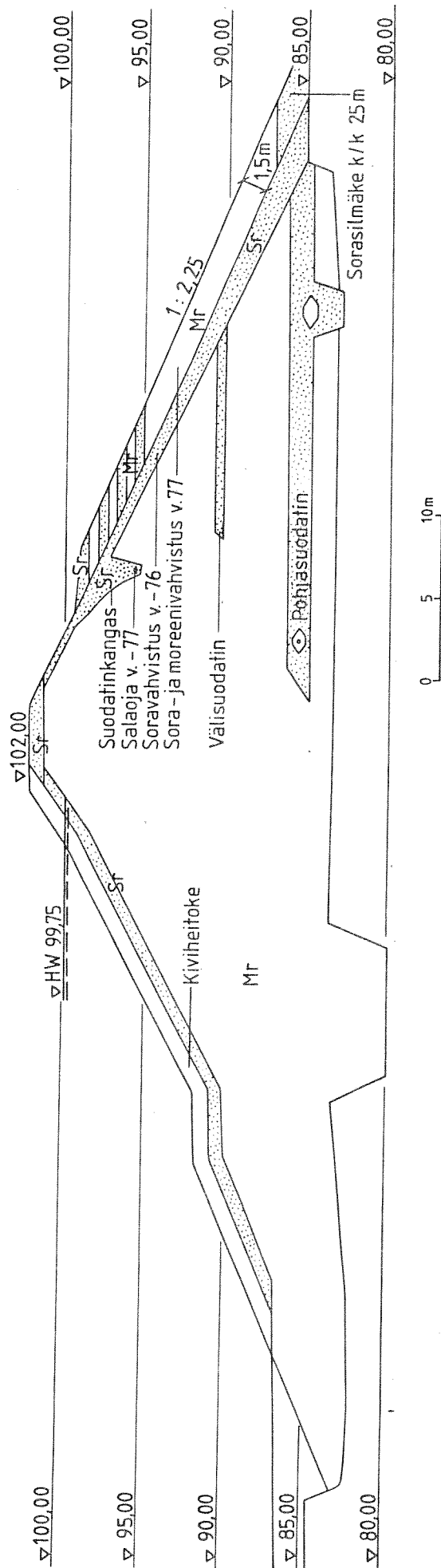
Kesällä 1976 havaittiin 17.6. padon kuivassa luiskassa paalulla 8+40 noin 1 m² suuruinen kostea laikku, jonka yläreuna oli tasolla 98,30. Laikku oli jatkunut 21.6. padon pituussuunnassa paalulle 8+50, jolloin noin 1 m² kosteat laikut olivat ilmestyneet myös paaluille 3+00 ja 10+00 korkeustasolle 97,00-98,00. Paaluilla 2+40, 2+63 ja 9+95 havaittiin 22.6. lisää kosteita laikkuja, joiden yläreunat olivat tasoilla 95,90, 95,40 ja 97,30. Märät laikut olivat jatkuneet 23.6. paaluvälillä 8+40 - 10+00, paalulla 3+00 laikut olivat kuivuneet. Märät vyöhykkeet olivat jatkuneet 24.6.-27.6. ja niitä oli useissa kohdin korkeustasolla 97,00-98,00.

Haapajärvellä alkoi 14.7.1976 lähes yhtäjaksoinen sadekausi, joka muuttui rankkasateeksi 16.7. klo 13.00 aikoihin. Klo 15.00 havaittiin padon kuivan luiskan yläosassa sortuma paalulla 10+20 ja valumia useissa kohdin, minkä jälkeen patoa alettiin vahvistaa välittömästi kuivan luiskan sorakerroksella. Rankkasateen sattuessa kuivan luiskan nurmetuksen kasvu oli alkuvaiheissaan. Lisäksi patoa vahvistettiin kesällä 1977 rakentamalla em. sorakerroksen päälle moreenista ja sorasta noin 1,5 m paksuinen kerros sekä tekemällä kuivaan luiskaan salaoja tasolle 95,00 padon läpi tulevien suotovesien poisjohtamiseksi (kuva 10).

4.2 HUOKOSVEDENPAINEEN MITTAUKSET PADOSSA

Huokosvedenpaineita on mitattu patoon lyödyistä putkista loppukesästä 1976 alkaen. Näköhavaintojen perusteella todettiin läpi-suotautumista useissa kohdin patoa alkukesällä 1976 (kohta 4.1).

Padon kuivaan luiskaan asennettiin 45 siiviläputkeä halkaisijaltaan 32 mm ja 50 mm sekä paalulle 8+47 6 pietsometriputkea.



Kuva 10. Hautaperän maapadon v. 1976-1977. vahvistuksien jälkeinen poikkileikkaus maalilla 8+47.

Kuvassa 11 on esitetty suurimmat mitatut vedenkorkeudet vuosina 1976 - 1981 havaintoputkissa paalulla 8+47. Eri vuosien mittausten perusteella ei ole voitu havaita huokosvesipaineiden muuttumista padossa järven vedenkorkeuden ollessa sama huolimatta vuonna 1977 tehdystä padon kuivan luiskan vahvistamisesta. Kuvassa 11 esitetyistä havaintoputkista rikkoontuivat padon vahvistustöissä vuonna 1977 putket 3, 6, 7 ja 8.

Pohjasuodattimessa olevan putken n:o 9 (kuva 11) vesipinta on pysynyt jatkuvasti suodattimen yläpinnan alapuolella lukuunottamatta jaksoa 22.6. - 16.10.-78, jolloin vesipinta putkessa on ollut enimmillään n. 25 cm suodattimen yläpinnan yläpuolella. Tämän perusteella suodattimen ja vähintään toisen muoviputki- ja kivilsalaojasta voidaan arvioida toimineen suotovesien poisjohtajana. Välisuodattimessa padon vahvistamiseen asti olleen putken n:o 8 (kuva 11) vesipinta säilyi myös suodattimen yläpinnan tason alapuolella, joten välisuodatin toimiessaan on todennäköisesti vähentänyt kuivan luiskan yläosan huokosvesipaineita.

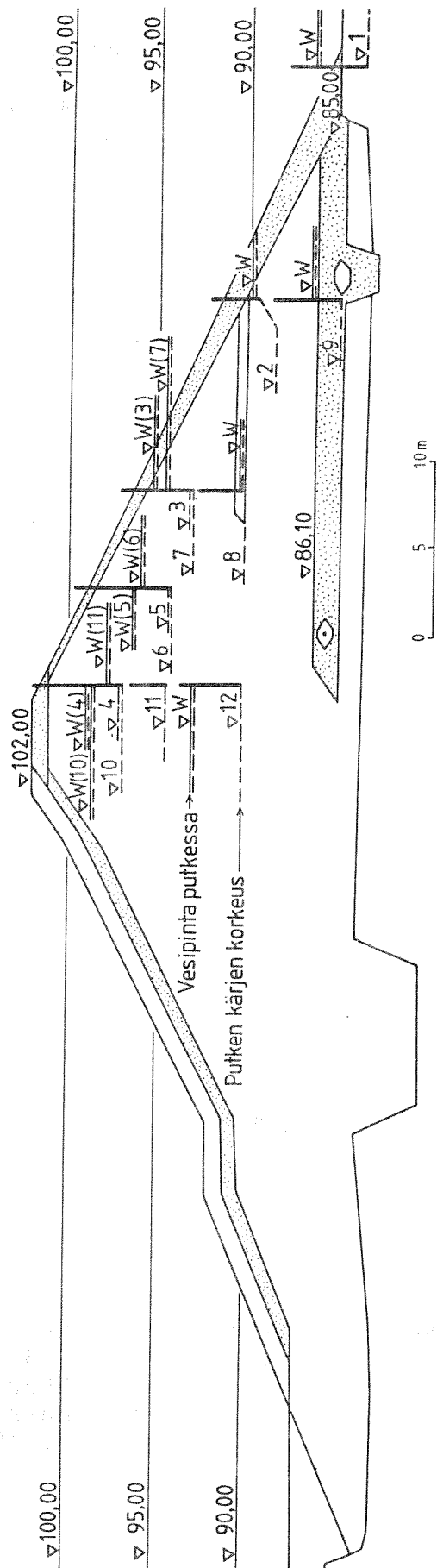
Padon luiskassa olevista putkista tehtyjen huokosvesipainemittausten perusteella suotovirtausvaikeuksia on esiintynyt koko padon alueella. Havaintoputkissa, joiden kärkien korkeudet ja etäisyydet padon keskilinjasta ovat samat kuin putken n:o 4 paalulla 8+47 (kuva 11), on vedenpinta noussut tason 98,00 yläpuolelle paaluilla 2+40, 3+00, 8+47, 8+70, 9+95, 10+60, 34+50 ja 37+00.

4.3 ROUTAMITTAUKSET PADOSSA

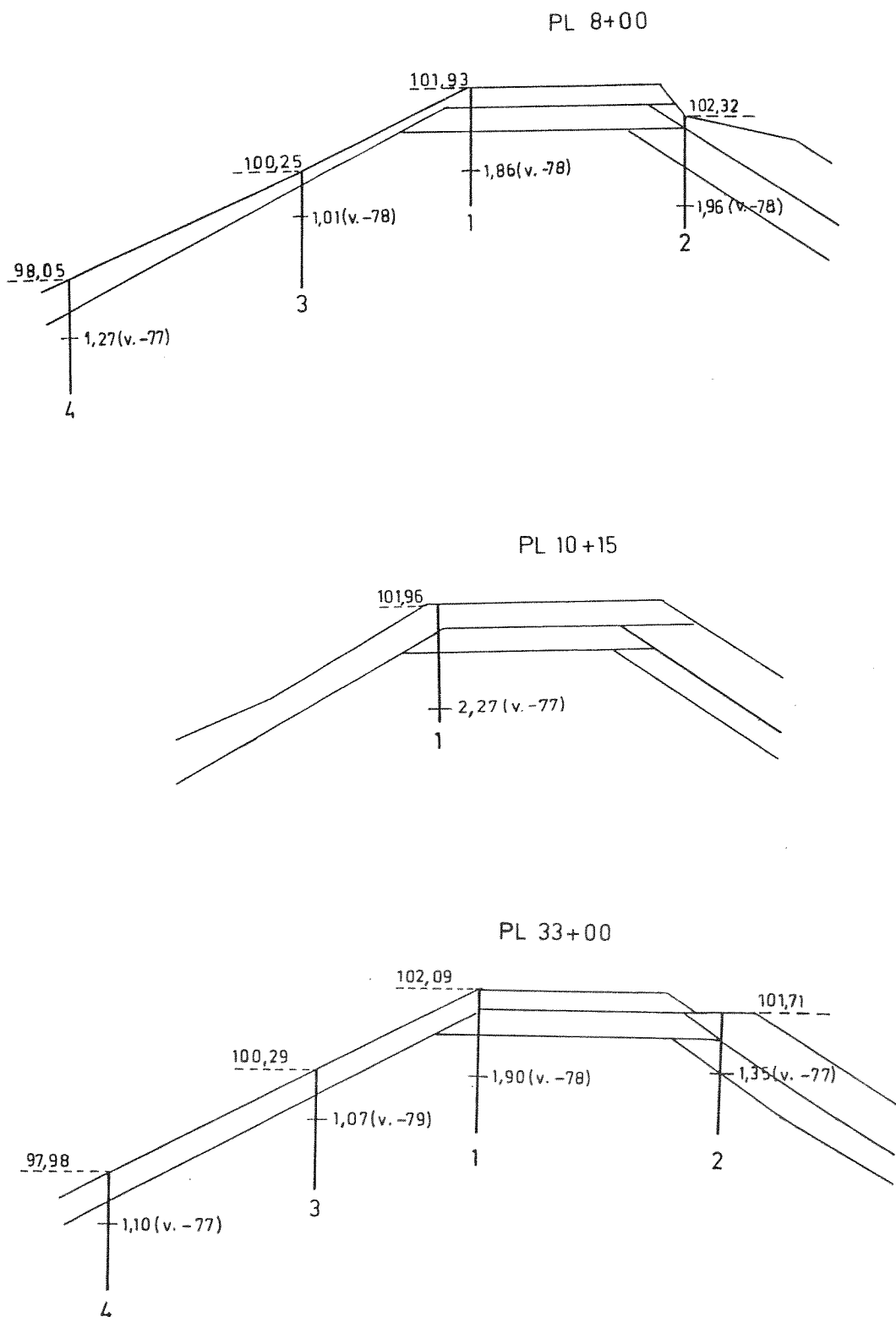
Talvella 1976 mitattiin roudan syvyydet padon harjan keskilinjalta 22.-23.4. Paalulla 3+00 roudan syvyys valmiin rakenteen pinnasta mitattuna oli 2,26 m ja paalulla 33+00 3,30 m. Padon harjan sorakerros rakennettiin talvella 1976, jolloin padon yläosa oli jo routaantunut.

Vuosina 1977 - 1980 routamittareista saadut suurimmat roudan syvyydet paaluilla 8+00, 10+15 ja 33+00 on esitetty kuvassa 12. Vuosina 1977 - 1980 suurimmat routasyvyydet ovat em. mittausten mukaan olleet välillä 1,01 - 2,27 m.

Putken n:o (P=pietso- metrikärki)	Kärjen korkeus	Korkein havait- tu vesipinta putkessa	Järven vesi- pinta havain- tohetkellä	Havainnon päivä- määrä	Putken käyttöaika
1	83,55	86,41	99,22	7.8.-78	elok. -76 -
2	89,52	89,90	99,41	9.10.-78	elok. -76 -
3	93,21	95,34	99,45	27.12.-76	elo-heinäk.-77
4	97,16	99,10	99,51	16.11.-78	elok.-76 -
5	94,48	96,53	99,22	7.8.-78	tammik.-77 -
6 P	94,37	96,16	98,12	6.6.-77	tammii-syysk.-77
7 P	92,97	94,80	98,12	6.6.-77	helmi-heinäk.-77
8 P	89,99	90,30	99,00	30.5.-77	helmi-heinäk.-77
9	84,73	86,36	99,22	7.8.-78	helmik.-77 -
10 P	96,97	98,79	99,51	16.11.-78	helmik.-77 -
11 P	94,47	97,79	99,46	11.11.-77	helmik.-77 -
12 P	90,03	92,93	99,36	19.9.-78	helmik.-77 -



Kuva 11. Hautaperän maapadon suurimmat vedenkorkeudet havaintoputkissa paalulla 8+47 v. 1976-1981.



Kuva 12. Suurimmat mitatut routasyvyydet Hautaperän maapadossa vuosina 1977-1980. Pl 8+00 mittauksia v. 1977-1978 (v. -78 ei mittari n:o 4). Pl 10+15 mittauksia v. 1977. Pl 33+00 mittauksia v. 1977 kaikki mittarit, v. 1978 n:ot 1 ja 3, v. 1979-1980 n:o 3.

4.4 SUOTOVESIMÄÄRÄT

Padon läpi suotautuvia vesimääriä on tarkkailtu Thompsonin mittapadoilla, joita on laskuojissa paaluilla 3+10, 8+00, 12+70 ja 33+10.

Suotovesimäärät ovat olleet em. mittapadoilla järven ollessa täynnä suuruusluokaltaan 1-2 l/s. Em. arvoja suuremmat vesimäärät, joita mittapadoilla on havaittu, johtuvat pintavesien pääsystä mittapadoille.

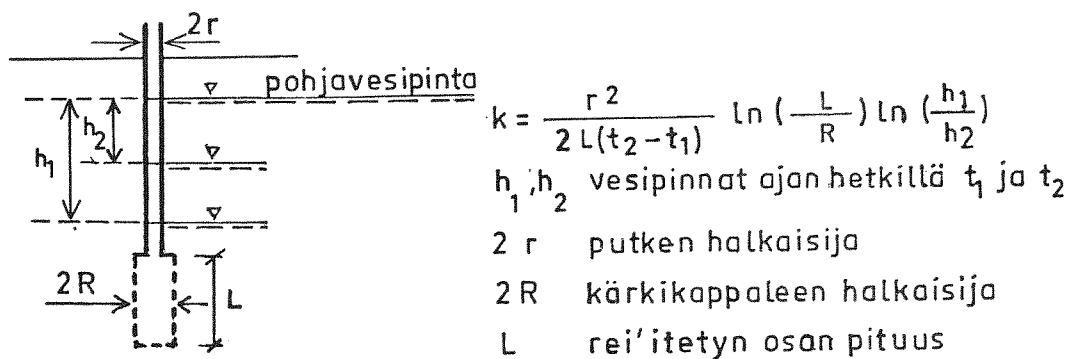
Padon vahvistuksen yhteydessä kuivaan luiskaan tasolle 95,00 tehdyistä salaojista tulevia vesimääriä on tarkkailtu 7 laskuaukosta. Enimmillään yhdestä laskuaukosta tullut vesimäärä on ollut noin 0,1 l/s.

Mittausten perusteella ei ole voitu havaita sellaisia muutoksia, jotka mahdollisesti osoittaisivat suodattimien toiminnan heikkenemistä tai padon läpi suotautuvien vesimäärien lisääntymistä.

4.5 VEDENLÄPÄISEVYYSKOKEET PADOLLA HUOKOSVESIPUTKIENTEN AVULLA

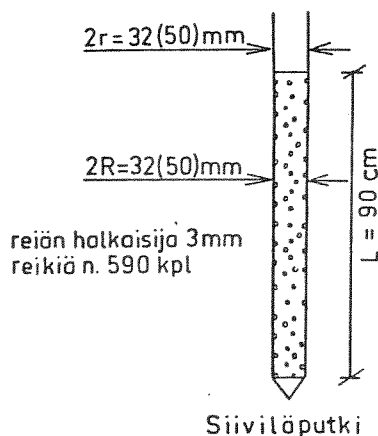
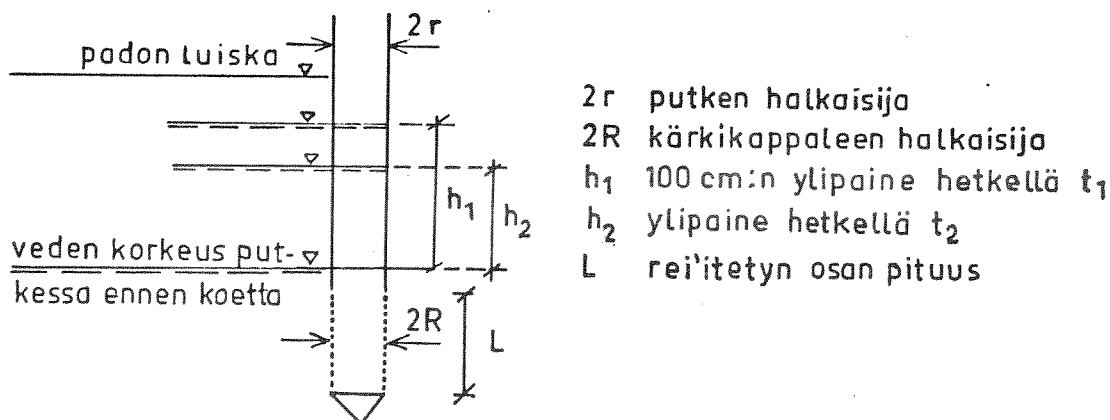
4.51 V e d e n l ä p ä i s e v y y s k o k e i s s a k ä y t e t t y m e n e t e l m ä

Cedergren (1967) on käsitellyt vedenläpäisevyyden määrittämistä mm. maahan lyödyn putken avulla (kuva 13). Kuvan tapauksessa vesi on pumpattu pohjavesipinnan etäisyydeltä h_2 etäisyydelle h_1 . Kuvassa esitetyn kaavan mukaan saadaan laskettua vedenläpäisevyyskerroin veden täysin kyllästämälle, äärettömän syvälle isotrooppiselle maakerrostumalle. Maa on isotrooppista vedenläpäisevyyden suhteen, kun vaakasuora vedenläpäisevyyskerroin (k_x) on yhtä suuri kuin pystysuora (k_y). Anisotrooppisuuden (kerrostuksessa maassa tavallisesti $k_x > k_y$) vaikutus otetaan huomioon jakamalla kärkekkäpaleen vaakamitat neliöjuurella $\sqrt{k_x/k_y}$, jolloin saadaan keskimääräinen vedenläpäisevyyskerroin $k = \sqrt{k_x \cdot k_y}$.

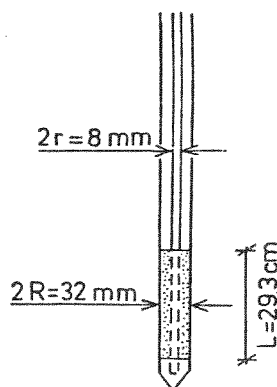


Kuva 13. Vedenläpäisevyyskertoimen määrittäminen.

Vedenläpäisevyyskokeet Hautaperän padolle suoritettiin lisäämällä huokosvedenpaineen mitta-putkiin 1,0 m ylipaine ja mittaamalla vedenkorkeus eri ajanhetkinä. Mittausvälineenä käytettiin pietso-metriputkissa sähköistä luotainta ja halkaisijoiltaan 32 mm ja 50 mm putkissa langan päässä olevaa onttoa holkkia, joka koskettaessaan vedenpintaa antoi kuuluvan äänen. Kokeen kaaviokuva on esitetty kuvassa 14.



Siiviläputki

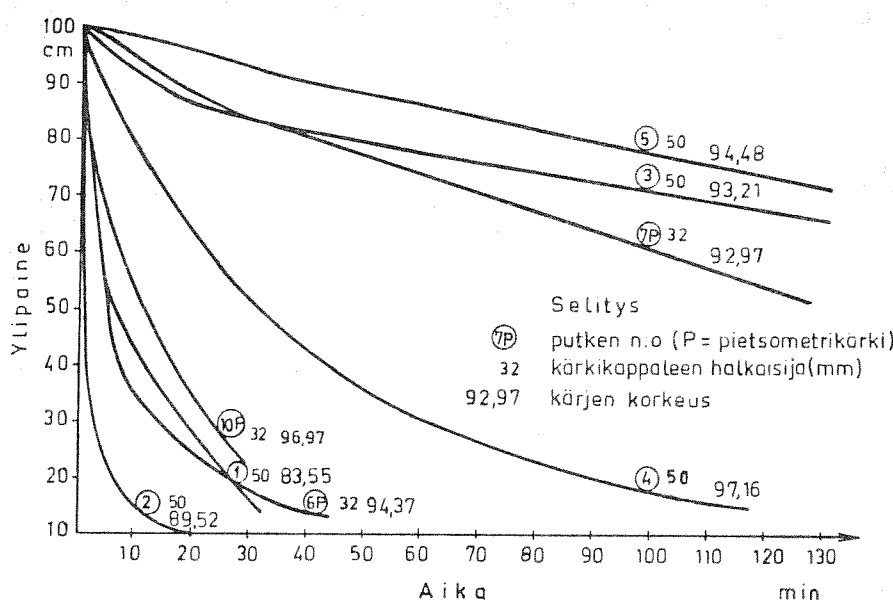


Pietso-metrikörjellä varustettu putki

Kuva 14. Hautaperän maapadon vedenläpäisevyyskokeiden 20.-23.6.1977 kaaviokuva.

4.52 Tulokset vedenläpäisevyyss- kokeista

Kuvassa 15 on esitetty paalun 8+47 vedenläpäisevyysskokeiden mittaustulokset käyrinä.



Kuva 15. Hautaperän padon paalun 8+47 vedenläpäisevyysskokeiden mittaustulokset käyrinä.

Lasketut vedenläpäisevyysskertoimet on esitetty taulukossa 4. Kertoimien arvot on laskettu kuvan 13 tavalla sovellettuna padolla tehtyyn mittaustapaan (kuva 14).

Laskuesimerkkinä käsitellään paalulla 8+47 olevan putken n:o 4 mittaustuloksia ($R = 2,5$ cm, $L = 90$ cm).

Kuvasta 15 putken numero 4 mittaustuloksia esittävältä käyrältä on ylipaineen $h_2 = 70$ cm kohdalta otettu vastaava aika $t_2 = 15,5$ min ($h_1 = 100$ cm, $t_1 = 0$). Sijoittamalla kuvan 13 kaavaan saadaan:

Taulukko 4. Hautaperän maapadon havaintoputkilla tehdyt vedenläpäisevyysokeet 20.-23.6.1977.
Kokeiden aikana vesipinta Hautaperänjärnessä oli 98,01-98,07 (HW = 99,75).

Paalu n:o	Putki n:o	Korkeus luis- kan pinnassa	Kärjen korkeus	Vedenpinta putkessa	Vedenläpäise- vyys 10^{-x} (m/s)	Paalu n:o	Putki n:o	Korkeus luis- kan pinnassa	Kärjen korkeus	Vedenpinta putkessa	Vedenläpäi- sevyys 10^{-x} (m/s)
2+40	1	101,12	96,98	97,95	6,28	10+20	1	94,30	89,73	92,73	-
3+00	1	100,85	97,30	97,80	6,37	10+60	1	100,85	97,48	97,83	7,76
	2	100,98	94,98	96,70	7,63		2	97,91	94,41	95,01	6,84
	3	101,11	92,21	95,79	7,86		3	98,01	92,41	tyhjä	-
	4	98,45	94,94	96,17	6,53	11+50	1	101,30	96,99	97,49	6,98
	5	98,38	92,58	94,81	6,46	13+00	1	100,83	96,94	97,36	7,55
	6	96,03	90,01	tyhjä	-	25+00	1	100,51	96,90	tyhjä	-
3+40	1	100,92	96,76	97,84	5,83	31+80	1	100,94	96,36	tyhjä	-
7+50	1	100,83	96,91	97,71	6,45	32+50	1	99,81	96,69	tyhjä	-
8+47	1	87,49	83,55	85,95	5,61	33+00	1	94,06	90,73	tyhjä	-
	2	91,24	89,52	89,72	5,13	33+20	1	100,99	97,23	tyhjä	-
	3	96,17	93,21	94,99	7,16		2	100,96	91,42	92,83	7,95
	4	101,10	97,16	98,12	6,32		3	98,62	95,48	tyhjä	-
	5	98,30	94,48	96,46	7,28		4	96,47	91,47	tyhjä	-
	6 P	98,18	94,37	96,03	6,85		5	96,46	87,96	tyhjä	-
	7 P	96,10	92,97	94,66	8,16		6	91,30	81,98	tyhjä	-
	8 P	86,10	89,99	90,26	-		7	98,59	92,08	92,88	7,86
	9	91,27	84,73	85,59	-	33+80	1	101,50	96,72	96,92	7,63
	10 P	100,95	96,97	97,81	6,96	34+50	1	100,88	97,06	98,29	6,71
	11 P	100,92	94,47	96,80	-	36+00	1	100,70	96,93	97,65	7,45
	12 P	100,87	90,03	92,07	-		2	97,72	94,97	tyhjä	-
8+70	1	100,95	97,00	97,76	6,31		3	97,65	91,97	tyhjä	-
9+95	1	100,74	96,94	97,98	6,51		4	100,37	95,00	95,58	6,93
	2	99,83	97,00	98,06	6,37	37+00	1	100,67	97,51	98,11	7,50
	3	98,72	95,00	95,61	6,86	37+80	1	100,88	97,10	97,56	7,46
						38+60	1	100,38	97,23	tyhjä	-

$$k = \frac{r^2}{2L(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{L}{R}\right) \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) = \frac{2,5^2}{2 \cdot 90 \cdot 15,5 \cdot 60} \ln\left(\frac{90}{2,5}\right) \ln\left(\frac{100}{70}\right)$$

$$= 10^{-6,32} \text{ m/s}$$

Käyttämällä kuvan 13 kaavaa ja ottamalla $k_x = 9 k_y$ saadaan

$$k_x = \frac{r^2}{2L(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{L \sqrt{k_x/k_y}}{R}\right) \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) = \frac{2,5^2}{2 \cdot 90 \cdot 15,5 \cdot 60} \ln\left(\frac{3 \cdot 90}{2,5}\right)$$

$$\ln\left(\frac{100}{70}\right) = 10^{-6,21} \text{ m/s}$$

Muut taulukossa 4 esitetyt vedenläpäisevyyškertoimet on laskettu samalla periaatteella käyttäen $k_x = k_y$.

5. SUOTOVIRTAUSMÄÄRITYKSET ELEMENTTIMENETELMÄLLÄ

5.1 VIRTAUSVERKKO JA TIETOKONEOHJELMA SUOTOVIRTAUKSEN RATKAISEMISEKSI

Hautaperän padon suotovirtauslaskelmat on suoritettu elementtimenetelmään perustuvalla tietokoneohjelmalla. Elementtimenetelmällä voidaan ratkaista differentiaaliyhtälö, kun tiedetään reunaehdot. Tuntematonta ratkaisufunktiota approksimoidaan paloittain lineaarisesti. Näin saadaan aikaan lineaarinen yhtälöryhmä, joka ratkaistaan tietokoneella.

Hautaperän padon suotovirtauslaskelmissa on käytetty kolmionmuotoisiin elementteihin perustuvaa tietokoneohjelmaa (Aalto 1974). Ohjelma ratkaisee 2-ulotteisen stationäärisen suotovirtauksen jossakin rajatussa alueessa. Paine korkeus on suotovirtauksen tuntematon funktio ja differentiaaliyhtälö, joka ratkaistaan, on Laplace-yhtälö, joka homogeenisessa, anisotrooppisessa tapauksessa saa muodon:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

$$h = \frac{p}{\gamma_w} + y \quad \text{paine korkeus}$$

p huokosvedenpaine

γ_w veden tilavuuspaino

y asemakorkeus

k_x vaakasuora vedenläpäisevyyskerroin

k_y pystysuora vedenläpäisevyyskerroin

Lähtötietoina ohjelmalle annetaan mm. nurkkapisteidä, elementtien ja reunaehtojen lukumäärät, jokaiselle nurkkapisteele x - ja y -koordinaatit, jokaiselle elementille nurkkapistenumerot ja materiaaliominaisuudet (k_x ja k_y vakioita elementin alueella) sekä reunaehdot.

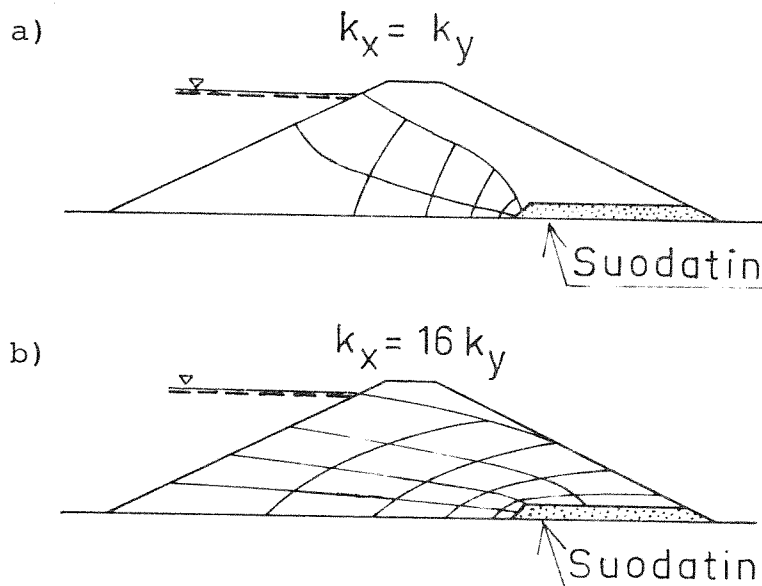
Reunaehtoja on kolmea tyyppiä. Tunnetaan paine korkeus h jollakin reunalla, läpivirtaus $v_n = 0$ jollakin reunalla (esim. maapadon läpäisemätön pohja) sekä suotoviiva, jonka sijainti ratkaistaan iteroimalla ja jossa paine korkeus h on suotoviivan korkeusasema ja läpivirtaus $v_n = 0$.

Suotovirtausohjelma laskee jokaisen elementin nurkkapisteen paine korkeuden ja jokaiseen elementtiin liittyvän nopeusvektorin, joka ilmaisee veden virtausnopeuden ja suunnan ko. elementin alueella.

Laplace-yhtälön graafinen ratkaisu on virtausverkko (kuva 16), jossa virtausviivat ja ekvipotentiaaliviivat ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan, kun vaakasuora vedenläpäisevyyskerroin k_x on yhtä suuri kuin pystysuora k_y (kuva 16a). Kun $k_x > k_y$ ovat virtaus- ja ekvipotentiaaliviivat vinosti toisiaan vastaan (kuvassa 16b $k_x = 16 k_y$).

Virtausviivan voidaan katsoa esittävän yksittäisten vesipisaroiden reittiä maaperässä. Kahden virtausviivan väliä kutsutaan virtauskanavaksi, jossa virtausmäärä on vakio. Jokaisella ekvipotentiaaliviivojen välillä tapahtuu samansuuruinen painehäviö ja jokaisessa samalla ekvipotentiaaliviivalla olevassa pisteessä

vesi kohoaa pisteeseen asetetussa avoimessa putkessa samalle korkeudelle, jota sanotaan pietsometriseksi korkeudeksi.



Kuva 16. Virtausverkot läpäisemättömällä pohjalla olevassa maapadossa, a) vaaka- ja pystysuorat vedenläpäisevyyskertoimet yhtä suuria ($k_x = k_y$), b) vaakasuora vedenläpäisevyyskerroin suurempi kuin pystysuora ($k_x = 16 k_y$). Cedergren 1948.

5.2 VEDENLÄPÄISEVYYSSUHITEISIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Tiiviydellä on oleellinen vaikutus moreenin vedenläpäisevyyteen. Moreenin ominaisuuksista vesipitoisuus vaikuttaa ratkaisevasti tiivistämistyön tulokseen. Vedenläpäisevyyteen tiiviyn ohella vaikuttaa myös moreenin rakeisuus. Tiiviyteen vaikuttaa tiivistämis-työssä käytetty kerrospaksuus, tiivistämiskoneet sekä ajokertojen lukumäärä.

Tiivistettäessä moreenikerros täryjyrällä ei kerroksen tiiviys tule samanlaiseksi kerroksen syvyysuunnassa, vaan tiiviys vaihtelee ollen kerroksen yläpinnassa suurin, mistä seuraa kerroksen vaakasuoran vedenläpäisevyyden muodostuminen suuremmaksi kuin pystysuora (Terzaghi 1943). Saman periaatteen mukaisesti eri kerrosten veden-

läpäisevyyskertoimien vaihdellessa tulee keskimääräinen vaakasuora vedenläpäisevyyskerroin aina suuremmaksi kuin pystysuora. Levitysmenetelmä voi aiheuttaa moreenissa olevien kivien kasautumista kerroksen alapintaan ja vedenläpäisevyyden lisääntymistä kerroksen alaosassa. Sillä, että vaakasuora vedenläpäisevyyskerroin tulee suuremmaksi kuin pystysuora, on oleellinen merkitys padon kuivan luiskan vakavuuteen.

5.3 TUTKITTU POIKKILEIKKAUS JA RATKAISUPERIAATE

Padon luiskassa olevista putkista tehtyjen huokosvedenpainemittaus-
ten perusteella suotovirtausvaikeuksia on esiintynyt koko padon
alueella (luku 4.2).

Kesällä 1976 kuivasta luiskasta tehtyjen näköhavaintojen perus-
teella (luku 4.1) läpisiuotautumista on tapahtunut padon alkuosal-
la. Tutkittavaksi poikkileikkaukseksi on valittu poikkileikkaus
paalulla 8+47, koska tällä paalulla on eniten havaintoputkia ja
näin suotovirtauksesta on tarkin kuva. Padon suurimmat hankaluu-
det ovat keskittyneet myös paalun 8+47 läheisyyteen. Paalun
8+47 mittauksien tulokset on esitetty luvussa 4.2 (kuva 11).

Elementtimenetelmän ratkaisualueeksi otettiin padon rakennettu
profiili. Padon alapuolinen maaperä jätettiin tarkastelun ulko-
puolelle, koska padon alta ei ole huokosvedenpainehavaintoja eikä
suotovirtauksen tarkastelua helpottavaa läpäisemättömän pohjan
sijaintia voitu määrittää.

Poikkileikkauksen moreenivyöhyke jaettiin elementtiverkkoa muo-
dostettaessa vaakasuoriin kerroksiin, koska padon rakentaminen
(luku 3) on tapahtunut vaakasuorina kerroksina. Kuivassa luis-
kassa oleva löyhempi pintakerros otettiin omaksi kerroksekseen.
Pato ei todellisuudessa muodostu selvästi erotettavista kerrok-
sista, vaan kerrokset on muodostettu tietokonelaskelmissa alku-
arvoina annettavien vedenläpäisevyyskertoimien käytön yksinker-
taistamiseksi.

Ratkaisualue on jaettu kerroksellisuus huomioonottaen kolmion-
muotoisiin elementteihin. Myös etuverhous, märän luiskan suoda-

tin, väli- ja pohjasuodatin jaettiin elementteihin. Pohjasuodattimessa olevat muoviputkisalaojan suodatin ja kivisalaoja otettiin myös huomioon elementtejä muodostettaessa. Märän luiskin kiviheitoke jätettiin elementtiverkon ulkopuolelle, koska sillä ei ole mitään vaikutusta padon suotovirtaukseen. Käytetty elementtiverkko on kuvassa 17.

Tehtävänä oli etsiä elementtimenetelmällä eri kerroksille sellaiset vedenläpäisevyyskertoimien arvot, joilla päästäisiin mahdollisimman lähelle havaintojen perusteella arvioitua suotovirtaus-tilannetta eli käytettyjen vedenläpäisevyyskertoimien avulla saatu suotoviiva sijaittisi samalla korkeudella kuin sen arvioidaan olevan padossa ja lasketut painearvot niissä kohdissa, missä huokosvedenpaineita on mitattu havaintoputkista, vastaisivat likimäärin mitattuja arvoja.

5.4 LASKELMAT JÄRVEN VEDENKORKEUDELLA $HW = 99,75$

5.41 Reunaehdot

Järven vedenkorkeus $HW = 99,75$ annettiin reunaehtona järven puolel-
selle luiskalle (kuva 18), joka samalla on ekvipotentiaaliviiva
(Harr 1962). Jokaisessa saman ekvipotentiaaliviivan pisteessä
on sama vesipaine eli vesi kohoaa avoimessa putkessa jokaisessa
ekvipotentiaaliviivan pisteessä samalle korkeudelle.

Padon pohjaosalle ei ollut tiedossa tarkkaa reunaehto-
pato ei ole läpäisemättömällä pohjalla eikä muita huokosvedenpai-
neen mittauksia pohjaosalta ollut kuin kuivan luiskan ja maan-
pinnan liittymäkohdassa oleva putki n:o 1 (kärjen korkeus 83,55),
jossa vedenkorkeus on ollut tasolla 86,00-86,40. Reunaehdoksi padon
pohjalle annettiin painekorkeusarvot, jotka etuverhouksen ala-
osan arvosta $h = 99,50$ suoraviivaisesti pienenevät pohjasuodatti-
men kohdalle tullessa arvoon $h = 86,10$ ja siitä eteenpäin $h =$
86,10 (kuva 18).

Pohjasuodattimessa olevassa putkessa n:o 9 (kärjen korkeus 84,73) mitatut painekorkeudet ovat vaihdelleet välillä 85,50–85,90 (poikkeuksellisesti 86,10–86,36 kesä-lokakuussa v. 1978). Pohjasuodattimen alareunalle annettiin reunaehdoksi mitatun painekorkeuden perusteella $h = 85,70$ (suodattimen alareunan korkeustaso 84,60). Koska suodattimen yläpintaa voidaan pitää ekvipotentiaaliviivana (Harr 1962), pohjasuodattimen yläreunalle annettiin reunaehdoksi sen korkeustaso, $h = 86,10$ (kuva 18).

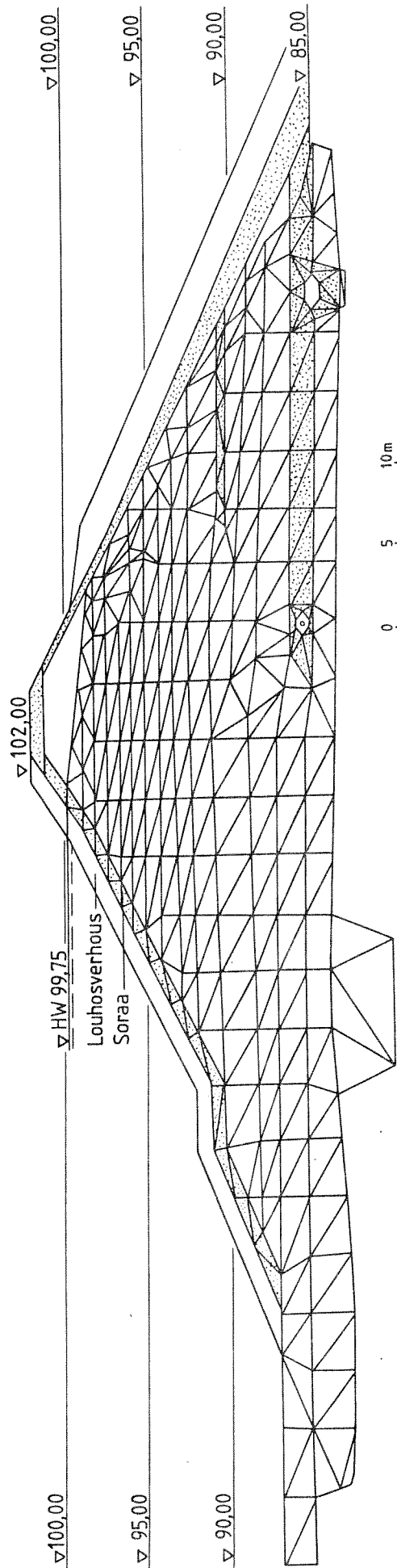
Välisuodattimessa olevassa pietsometriputkessa n:o 8 (kärjen korkeus 89,99, suodattimen alareunan korkeustaso 90,00) tehtyjen mittausten perusteella annettiin alareunalle reunaehdoksi $h = 90,20$ ja yläreunalle sen korkeustaso $h = 90,50$. Välisuodattimen alapuolella olevassa putkessa n:o 2 (kärjen korkeus 89,52) on vettä ollut noin 20 cm (enimmillään n. 40 cm), joka lähes vakiona pysynyt määrä ilmeisesti valuu välisuodattimesta (kuva 11). Vesi on suotautunut padon läpi näköhavaintojen perusteella (luku 4.1), joten kuiva luiska on suotopinta. Suotopinta ei ole ekvipotentiaali- eikä virtausviiva (Harr 1962). Suotopinnalla on painekorkeutena sen korkeusasema, joka annettiin reunaehdoksi (kuva 18).

Padon sisäisellä suotoviivalla on kohtisuora virtausnopeus $v_n = 0$ ja painekorkeutena h on sen korkeusasema, jotka annettiin reunaehdoiksi (kuva 18). Suotoviiva on samalla ylin virtausviiva.

5.42 V e d e n l ä p ä i s e v y y s k e r t o i m i e n m ä ä r i t y k s e t e l e m e n t t i m e n e - t e l m ä l l ä

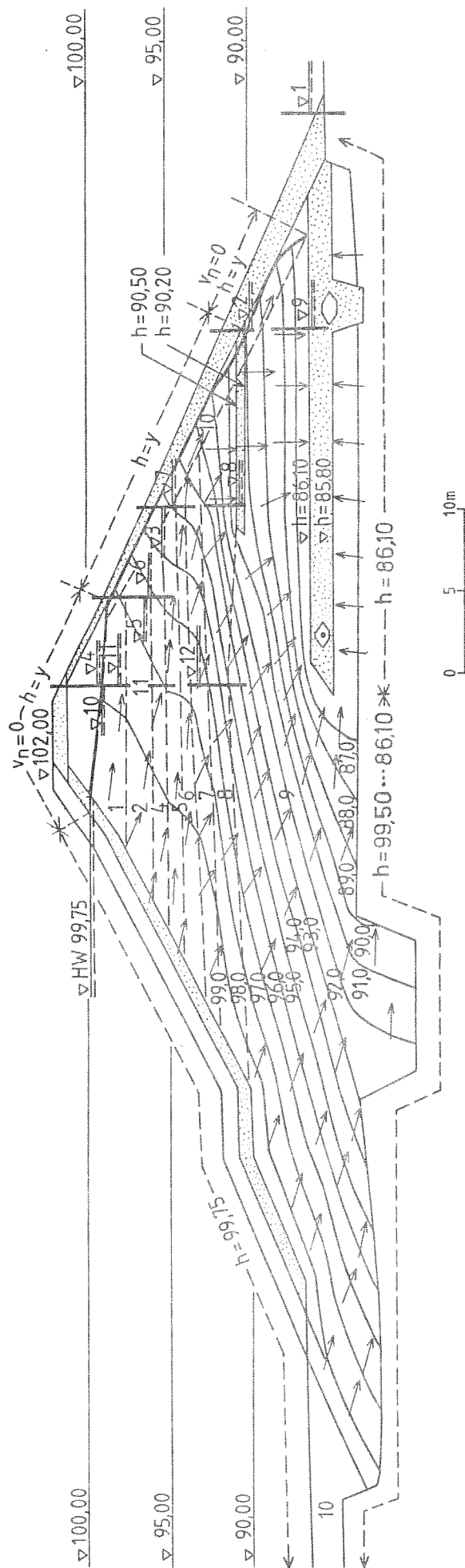
Arviointiperusteena lähtöarvojen antamisessa käytettiin padolla tehtyjen vedenläpäisevyyskokeiden tuloksia (luku 4.52).

Vaakasuora vedenläpäisevyyskerroin k_x arvioitiin suuremmaksi kuin pystysuora k_y moreenirungon rakennustavasta johtuen (luku 3.1). Vaakasuorien kerroksien vedenläpäisevyyskerroin ollessa eri suuret, tulee kerrosten keskimääräinen vaakasuora vedenläpäisevyys suuremmaksi kuin pystysuora (Terzaghi 1943). Samoin yksittäisen kerroksen vedenläpäisevyyden vaihdellessa syvyysuunnassa, on



Kuva 17. Hautaperän maapadon paalun 8+47 suotovirtausmäärittelyssä käytetty elementtiverkko.

Kerros n:o	$k_x = 10^{-x} \text{ (m/s)}$	Elementtimenetelmän reunaehdoja:	Putki n:o	Suurin vedenk korkeus v. 1976-1977
1	6,00	v^n kohtisuora virtausnopeus	1	86,12
2	6,70	h^n painekorkeus	2	89,70
4	7,00	y korkeuskoordinaatti	3	95,34
5	6,60	reuna $v^n = 0$ ja $h = y$ on suotoviiva	4	99,08
6	7,30	reuna $h^n = y$ on suotopinta	5	96,49
7	8,00	reuna $h = 99,75$ on ekvipotentiaaliiviiva	6P	96,16
8	8,40		7P	94,80
9	8,40		8P	90,30
10	6,00		9	86,01
suodattimet				98,69
	4,00		10P	97,79
			11P	92,80
			12P	



Kuva 18. Hautaperän maapadon paalun 8+47 suotovirtausmääritykset elementtimenetelmällä. Tilanne ennen syksyn 1977 padon lisävahvistusta. Vaakasuora vedenläpäisevyyserroin $k_x = 9 \text{ kv}$ ($k_y = \text{pystysuora vedenläpäisevyys}$). Ekvipotentiaaliiviivat (painekorkeudet 87,00-99,00), nopeusvektorit (veden virtaussuunnat ko. pisteissä) ja mitatut vedenkorkeudet putkissa.

yksittäisessä kerroksessa $k_x > k_y$. Hautaperän maapadon työn aikana tehdyissä vedenläpäisevyyskokeissa saatujen kertoimien jakautuma on esitetty luvussa 3.22. Tietokonelaskelmissa käytettiin k_x/k_y :n arvoina 9 ja 16, jotka olivat vakioita koko padon poikkileikkauksessa.

Vedenläpäisevyyskertoimien yhdistelmän hakeminen tapahtui yrityser ehdysmenetelmällä. Kunkin tietokoneajon tuloksia tarkastelemalla muutettiin vedenläpäisevyyskertoimien arvoja oikeaan lopputulokseen pääsemiseksi. Oikean lopputuloksen arviointiperusteena olivat mitatut painekorkeudet ja havaittu läpisyotautuminen padon kuivassa luiskassa, joiden perusteella arvioitiin myös suotoviivan sijainti.

Elementtimenetelmällä saadut vedenläpäisevyyskertoimet ja lasketut ekvipotentiaaliviivat on esitetty kuvissa 18-21 sekä kuvassa 18 lisäksi nopeusvektorit, jotka ilmaisevat veden virtaus-suunnat määrätyissä pisteissä. Kuvat 18 ja 19 edustavat padon tilannetta ennen vahvistusta 1977 ja kuvat 20 ja 21 vahvistuksen jälkeistä tilannetta. Vedenläpäisevyyskokeiden aikana kesällä 1977 vesipinta järvessä oli tasolla 98,05, johon liittyvät laskelmat on julkaistu erikseen (Maijala 1978).

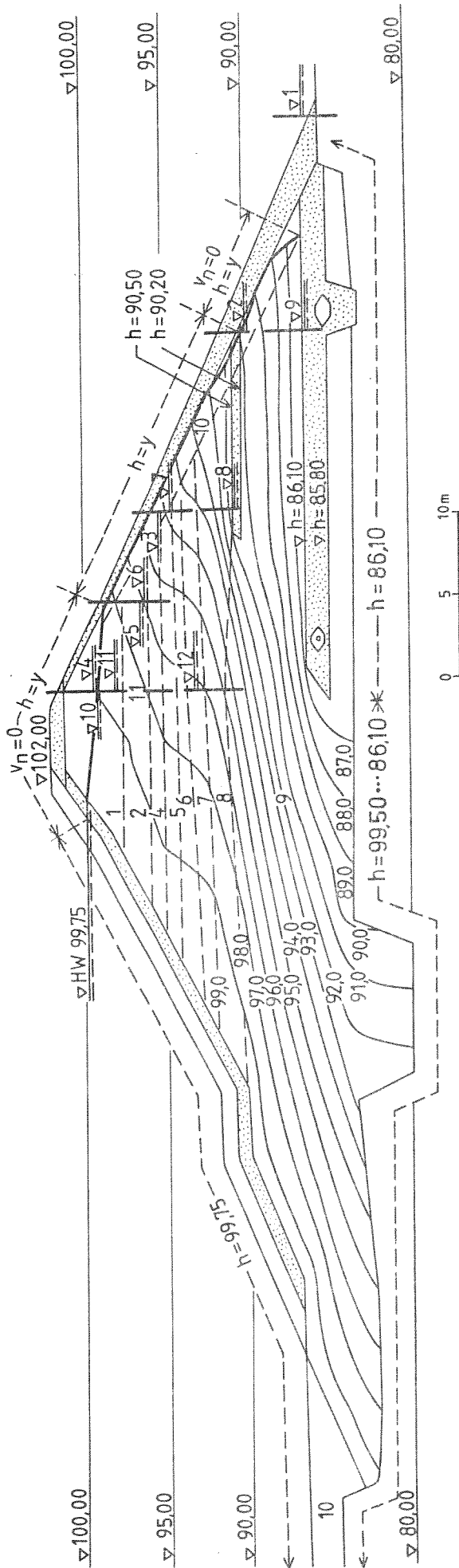
5.5 TULOSTEN TARKASTELU

5.51 P a d o n p o h j a o s a

Koska padon pohjaosalle ei ollut tiedossa tarkkaa reunaehto, tarkasteltiin pohjan vaikutusta tuloksiin muuttelemalla pohjaosan elementtien nurkkapisteille reunaehtoina annettuja painearvoja. Tutkittiin tapausta $k_x = 9 k_y$ vedenkorkeudella 99,75.

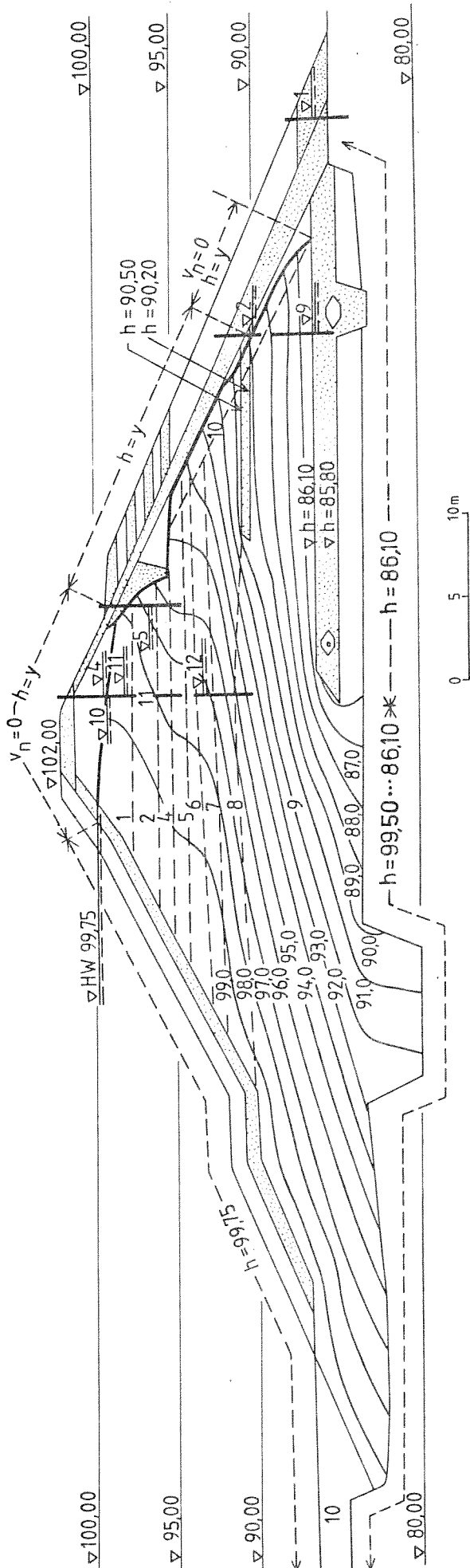
Käyttämällä suurempia ja pienempiä painearvoja reunaehtoina pohjaosalle (reuna $h = 99,50 \dots 86,10$, kuva 18), voitiin todeta painearvojen (ekvipotentiaaliviivojen, kuva 18) säilyvän täsmälleen samoina tason 92,00 yläpuolella. Myös suotoviiva säilyi samana. Ekvipotentiaaliviivat tulivat jyrkemmiksi pohja-suodattimen kärjen vedenpuoleisella ja tason 92,00 alapuolisella

Kerros n:o	$k_x = 10^{-x}$ (m/s)	Elementtimenetelmän reunaehtoja:	Putki n:o	Suurin vedenkorkeus v. 1976-1977
1	6,00	v_n kohtisuora virtausnopeus	1	86,12
2	6,70	h_n painekorkeus	2	89,70
4	7,00	y korkeuskoordinaatti	3	95,34
5	6,40	reuna $v_n = 0$ ja $h = y$ on suotoviiva	4	99,08
6	6,80	reuna $h = y$ on suotopinta	5	96,49
7	7,40	reuna $h = 99,75$ on ekvipotentiaaliiviiva	6P	96,16
8	8,00		7P	94,80
9	8,40		8P	90,30
10	5,70		9	86,01
suodattimet	4,00		10P	98,69
			11P	97,79
			12P	92,80



Kuva 19. Hautaperän maapadon paalun 8+47 suotovirtausmääritykset elementtimenetelmällä. Tilanne ennen syksyn 1977 lisävahvistusta. Vaakasuora vedenläpäisevyyserroin $k_x = 16$ ky (ky = pystysuora vedenläpäisevyys). Ekvipotentiaaliiviivat (painekorkeudet 87,00-99,00) ja mitatut vedenkorkeudet putkissa.

Kerros n:o	$k_x = 10^{-x}$ (m/s)	Elementtimenetelmän reunaehtoja:	Putken n:o	Suurin vedenkorkeus (1977-1981)
1	6,00	v_n kohtisuora virtausnopeus	1	86,41
2	6,70	h_n painekorkeus	2	89,90
4	7,00	y korkeuskoordinaatti	4	99,10
5	6,60	reuna $v_n = 0$ ja $h = y$ on suotoviiva	5	96,53
6	7,30	reuna $h = y$ on suotopinta	9	86,36
7	8,00	reuna $h = 99,75$ on ekvipotentiaaliiviiva	10P	98,79
8	8,40		11P	97,79
9	8,40		12P	92,93
10	6,00			
suodattimet				
	4,00			



Kuva 20. Hautaperän maapadon paalun 8+47 suotovirtausmääritykset elementtimenetelmällä. Tilanne syksyn 1977 lisävahvistuksen jälkeen. Vaakasuora vedenläpäisevyyskerroin $k_x = 9$ ky (k_y = pystysuora vedenläpäisevyys). Ekvipotentiaaliiviivat (painekorkeudet 87,00-99,00) ja mitatut vesipinnat putkissa.

padon osalla suurempia painearvoja reuhaehtoina käytettäessä. Pienempiä painearvoja käytettäessä ekvipotentiaaliviivat tulivat loivemmiksi.

Pohjasuodattimien alapuolisen osan (reuna $h = 86,10$) painearvojen muuttamisella ei ole merkitystä yläpuolella oleviin kerroksiin, koska pohjasuodattimen on todettu huokosvedenpainemittausten perusteella toimivan ja näin katkaisevan alapuolella olevien huokosvedenpaineiden vaikutuksen.

Padon pohjaosan huokosvedenpaineiden vaikutuksesta voitiin siis todeta, ettei sillä ole vaikutusta padon yläosan suotovirtaukseen ja läpisyotautumiseen kuivassa luiskassa.

5.52 Vä l i s u o d a t i n

Välisuodattimen vaikutusta suotovirtaukseen tarkasteltiin jättämällä suodattimen ylä- ja alapinnan reunaehdot (kuva 18) pois sekä vaihtamalla suodattimessa oleva sora moreeniksi. Vedenläpäisevyyskertoimiksi annettiin taulukon 5 mukaiset arvot ($HW = 99,75$, $k_x = 9 k_y$), jolloin entiselle välisuodattimelle tuli kerrosten 9 ja 10 (kuva 18) mukaiset k -arvot.

Tietokoneajoilla todettiin painearvojen ja samalla läpisyotautumisen koko kuivassa luiskassa muodostuvan huomattavasti voimakkaammaksi ilman välisuodatinta, joten välisuodatin toimiessaan on helpottanut poikkileikkauksen suotovirtaustilannetta.

5.53 V e d e n l ä p ä i s e v y y s k e r t o i m e t

Taulukossa 5 on esitetty elementtimenetelmällä ja vedenläpäisevyyskokeilla saadut kertoimet.

Taulukko 5. Elementtimenetelmällä ja vedenläpäisevyyskokeilla (20.-23.6.77) saadut vedenläpäisevyyskertoimet 10^{-X} m/s, vedenkorkeus elementtimenetelmässä HW = 99,75 ja kokeiden aikana 98,01-98,07.
 k_x = vaakasuora ja k_y = pystysuora vedenläpäisevyys.

Elementtimenetelmässä käytetyt kerrokset		V e d e n l ä p ä i s e v y y s k e r t o i m e t 10^{-X} m/s			Vedenläpäisevyyskoe	
		Elementtimenetelmä		k	putken n:o	kärjen korkeus
n:o	korkeustaso	$k_x = 9 k_y$ k_x	$k_x = 16 k_y$ k_x			
1	97,30-ylös	6,00	6,00	6,32	4	97,16
2	95,80-97,30	6,70	6,70	6,96	10P	96,97
4	95,00-95,80	7,00	7,00	7,28	5	94,48
5	94,10-95,00	6,60	6,40	6,85	6P	94,37
6	93,30-94,10	7,30	6,80	7,16	3	93,21
7	92,30-93,30	8,00	7,40	8,16	7P	92,97
8	91,00-92,30	8,40	8,00			
9	padon pohja- 91,00	8,40	8,40			
10	kuiva luiska	6,00	5,70	5,13	2	89,52
3	suodattimet	4,00	4,00			

Suurimman (ylin kerros, n:o 1) ja pienimmän (alin kerros, n:o 9) vedenläpäisevyyskertoimen suhde vedenkorkeudella 99,75 on 250 molemmilla k_x/k_y :n arvoilla 9 ja 16.

Tietokoneajoja suoritettaessa tultiin siihen tulokseen, että ratkaisevaa ei ole suurimman (ylin kerros, n:o 1) ja pienimmän (alin kerros, n:o 9) k-arvon suhteen suuruus, vaan välisuodattimen yläpuolella olevien kerrosten vedenläpäisevyyksien keskinäinen suuruus. Mitä ylempänä olevan kerroksen vedenläpäisevyysarvoa muutettiin, sitä herkemmin reagoi suotoviiva. Mikäli esim. tasolla 95,00 olevan kerroksen (n:o 4) vedenläpäisevyyskertoimen arvoa pienennettiin eli kerros tuli tiiviimmäksi, siirtyi suotoviiva

ylemmäksi; tällöin kerros toimi jonkinasteisena pohjana. Mikäli taas saman kerroksen arvoa suurennettiin laski suotoviiva; tällöin kerros toimi jonkinasteisena suodattimena.

Padon anisotrooppisuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat moreenin rakeisuus, vesipitoisuus ja tiivistämismenetelmä. Kahden päälekkäisen patoon tiivistetyn kerroksen vedenläpäisevyyskertoimien ollessa erisuuret tulee kerrosten keskimääräinen vaakasuora kerroin k_x suuremmaksi kuin keskimääräinen pystysuora kerroin k_y luvun 5.2 perusteella.

Kun elementtimenetelmässä on käytetty välisuodattimen yläpuolella suhteellisen ohuita kerroksia, joissa k-arvot vaihtelevat, lienee $k_x/k_y = 16$ liian suuri kaikissa kerroksissa käytettynä. Todennäköisemmältä vaikuttaa k_x/k_y :n arvo 9.

Sillä, että käytetyissä vedenläpäisevyyskertoimissa myös suodatinsoralla on $k_x > k_y$, ei tietokoneajojen perusteella todettu olevan mitään vaikutusta lopputulokseen ja se, että annettiin soralle arvot $k = 10^{-4}$ tai 10^{-5} m/s ei muuttanut lopputulosta. Koska väli- ja pohjasuodatin on käsitelty reunaehdoilla, ei niissä olevan soran vedenläpäisevyyskertoimien suuruuksilla ole saatuihin ekvipotentiaaliviivoihin mitään vaikutusta.

Mikäli olisi käytetty riittävän monta (ohjelma rajoitti 10:een) ohutta kerrosta, joille olisi voitu vaihdella vedenläpäisevyysarvoja, olisi suotovirtaus voitu käsitellä tapauksena $k_x = k_y$.

Kun verrataan elementtimenetelmällä saatuja k-arvoja vedenläpäisevyyskokeilla saatuihin (taulukko 5), voidaan todeta tapauksen $k_x = 9 k_y$ vaakasuorien kertoimien k_x suuruuksien vaihtelun olevan likimäärin samanlainen vedenläpäisevyyskokeilla saatujen kanssa. Padon alaosan (kerrokset 8 ja 9) k-arvot tulivat muita pienemmiksi havaintoputkesta n:o 12 tehtyjen mittausten suuruisen painearvon saamiseksi elementtimenetelmällä.

Padon suotovirtaustilanne muodostuu vedenläpäisevyyskertoimien vaihtelusta padon eri osissa ja padon anisotrooppisuudesta vedenläpäisevyyden suhteen.

5.6 YHTEENVETO VEDENLÄPÄISEVYYSMÄÄRITYKSISTÄ

Hautaperän padon moreenirungon rakennustyön aikana tehdyillä kenttäkokeilla on vedenläpäisevyyškertoimen negatiivisen potenssin keskiarvoksi saatu 7,72 ja hajonnaksi 0,64 (luku 3.22). Laboratoriossa vastaaviksi arvoiksi saatiin 7,96 ja 0,43.

Kesällä 1977 padon luiskaan lyödyillä huokosvesiputkillä suoritetuilla vedenläpäisevyyškokeilla saatiin vedenläpäisevyyškertoimia, jotka olivat $k = 10^{-5,83} - 10^{-8,16}$ m/s ($k = 10^{-5,13}$ m/s pl 8+47 putkessa n:o 2, joka on kuivassa luiskassa ja osittain välisuodattimessa). Vedenläpäisevyyškokeiden tulokset ovat luvussa 4.52.

Tutkittaessa padon suotovirtausta elementtimenetelmään perustuvalla tietokoneohjelmalla on vaakasuora vedenläpäisevyys k_x arvioitu suuremmaksi kuin pystysuora k_y moreenirungon rakennustavasta johtuen (luku 5.2). Laskennassa käytettiin k_x/k_y :n arvoina 9 ja 16. Suhteella $k_x/k_y = 9$ saadut k_x :n arvot ovat likimain vedenläpäisevyyškokeilla saatujen k -arvojen suuruisia ja lasketut painekorkeudet ja vastaavat mitatut painekorkeudet ovat myös likimäärin yhtäsuuria (luku 5.42 kuva 18, luku 5.53 taulukko 5). Pienin laskettu arvo on $k_x = 10^{-8,40}$ m/s padon alaosassa (tasolta 92,30 alaspäin) ja suurin $k_x = 10^{-6,00}$ m/s padon yläosassa (tasolta 97,30 ylöspäin).

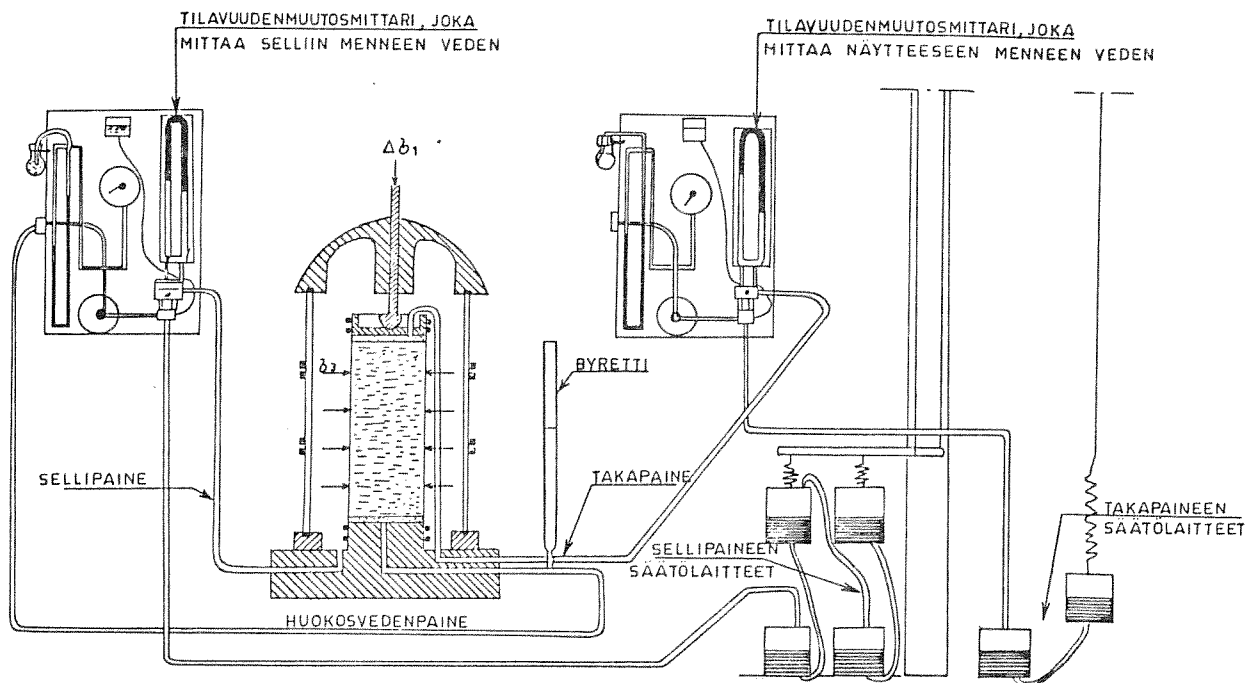
Vedenläpäisevyyškertoimien vaihtelun padossa voidaan otaksua johtuvan rakennusmateriaalina käytetyn moreenin vedenläpäisevyysominaisuuksien ja tiiviysasteen vaihteluista. Padon yläosassa ja luiskissa on lisäksi roudalla ollut todennäköisesti löyhdyttävä vaikutus tiivistettyyn moreeniin. Vuonna 1976 mitattiin padon harjalla roudan syvyydet 2,26 m paalulla 3+00 ja 3,30 m paalulla 33+00. Vuosina 1977-1978 suurimmat routasyvyydet (luku 4.3) padon harjalla ovat olleet 1,86 m paalulla 8+00 (mittauksia v. 1977-1978), 2,27 m paalulla 10+15 (mittauksia v. 1977) ja 1,90 m paalulla 33+00 (mittauksia v. 1977-1978). Talvella -76 harjan soraverhous tehtiin vasta pakkaskauden alettua.

6. KOLMIAKSIAALISET PURISTUSKOKEET

6.1 KOEMENETELMÄT

6.11 Laitteisto ja koemenetelmät

Kolmiaksiaalisen puristuskokeen eri laitteiden kytkentäkaavio on kuvassa 22.



Kuva 22. Kolmiaksiaalisen puristuskokeen laitteiden kytkentäkaavio.

Laitteistoon kuuluivat puristinlaite, selli, takapaineen ja sellipaineen säätölaitteet, kuormitusrengas ja kaksi paineenmittaustaulua. Sellipaineen ja takapaineen arvot pysyvät automaattisesti vakioina. Elohopea-astioiden jousi kompensoi virtauksesta aiheutuneet elohopeapintojen muutokset. Kytkemällä elohopea-astioita sarjaan voidaan paine nostaa haluttuun arvoon.

Kolmiaksiaalikokeista osa suoritettiin konsolidoituna nopeana kokeena (consolidated undrained test eli cu-koe) osa avoimena kokeena (drained test eli d-koe) sekä osa suljettuna nopeana kokeena (undrained test eli u-koe).

Konsolidoidussa nopeassa kokeessa, cu-kokeessa, kuormitus (sellipaineen lisäys) tapahtuu hitaasti ja leikkaus (aksiaalinen lisäkuorma) nopeasti ts. maanäyte ehtii kuormituslisäyksen vai-

kutuksesta täydellisesti konsolidoitua, mutta leikkaus suoritetaan niin nopeasti ja sellaisissa olosuhteissa, ettei konsolidoitumista leikkausvoiman vaikutuksesta ehdi tapahtua.

Avoimessa kokeessa, d-kokeessa, sekä kuormitus että leikkaus suoritetaan niin hitaasti ja sellaisissa olosuhteissa, että maanäyte sekä kuormituslisäyksen että leikkausvoiman vaikutuksesta ehtii täydellisesti konsolidoitua.

Suljetussa nopeassa kokeessa, u-kokeessa, kuormitus ja leikkaus suoritetaan niin nopeasti ja sellaisissa olosuhteissa, ettei maanäyte kuormituslisäyksen eikä leikkausvoiman vaikutuksesta ehdi lainkaan konsolidoitua.

Sellipaineina käytettiin 50, 100, 150 ja 200 kN/m². Konsolidoidussa nopeassa kokeessa käytettiin takapainetta näytteiden konsolidoimiseen.

6.12 T a k a p a i n e

Koekappaleiden konsolidoimiseen cu-kokeessa käytettiin takapainetta. Takapaineen tarkoituksena oli estää näytteissä olevan ilman haitallinen vaikutus. Bishopin ja Henkelin tutkimusten (1964) mukaan 210 kN/m² takapaine on riittävä liuottamaan kaiken ilman näytteistä. Näytteen kyllästysaste S_r on tällöin 100 %. Koska luonnossa vallitsevat jännitykset ovat pieniä, käytettiin tutkimuksessa pieniä sellipaineita (suurin 200 kN/m²). Tämän vuoksi suurten takapaineiden käyttö ei ollut mahdollista. Taulukossa 6 on esitetty kokeissa käytetyt takapaineet ja sellipaineet.

Taulukko 6. Konsolidoidussa nopeassa kolmiaksaalikoikeessa (cu-kokeessa) käytetyt takapaineet ja sellipaineet.

Sellipaine σ_3 kN/m ²	Takapaine u kN/m ²	Tehokas jännitys σ'_3 kN/m ²
50	25	25
100	50	50
150	75	75
200	100	100

Maaperässä pohjaveden pinnan alapuolella oleva maa-aines on täysin vedellä kyllästynyt. Lähellä maanpintaa esiintyy vyöhykkeitä, joissa maa-aineksen huokosissa on ilmaa ja/tai vettä. Maapadossa voidaan myös havaita vastaavat vyöhykkeet. Luonnollisesti maa-aines sisältää ilmaa täysin vedellä kyllästyneessä tilassakin, ilma on tällöin veteen liuenneena. Schuurmanin (1966) mukaan maa-aineksen huokosissa oleva ilma on yksittäisinä kuplina, kun maan kyllästysaste S_r ylittää 85 %.

6.13 Näytteen valmistus

Kolmiaksiaalikokeissa käytetyt näytteet olivat silttistä hiekka-moreenia. Moreenia käytettiin Hautaperän maapadon moreenirunkoon. Näytteet sullottiin parannetulla Proctor-menetelmällä saadun optimitiiviyden mukaan. Näytteen korkeus oli 20,30 cm ja halkaisija oli 10,15 cm. Tiiviysaste määritettiin alla olevan yhtälön mukaan:

$$D = \gamma_d / \gamma_{dmaks}$$

D	tiiviysaste
γ_d	sullonnassa saatu kuivatilavuuspaino
γ_{dmaks}	parannetusta Proctor-menetelmästä saatu maksimikuivatilavuuspaino

Sullonta suoritettiin 0,5,8 ja 10 % vesipitoisuuksilla. Näytteet valmistettiin juntaamalla Proctor-vasaralla, mutta kuiva näyte ja 85 % sullonta-asteen omaava näyte tehtiin juntaamalla käsin puunuijalla. Näytteiden säilytysajat olivat 1 vrk, 2 vk ja 1 kk.

6.14 Leikkaus

Näytteen leikkausnopeus ($= \frac{d\epsilon_1}{dt}$) konsolidoiduissa ja suljetuissa nopeissa kokeissa (cu-kokeissa ja u-kokeissa) oli noin 0,03 %/min (=1,7 %/h) sekä avoimissa kokeissa (d-kokeissa) noin

0,006 %/min (=0,4 %/h). Leikkausta jatkettiin yleensä niin kauan, että saavutettiin jäännöslujuus. Jos selvää murtokohtaa ei saavutettu, niin leikkausta jatkettiin niin kauan, että lujuus kasvoi vain vähän aksiaaliseen muodonmuutokseen ϵ_1 verrattuna. Tavallisesti leikkaus lopetettiin, kun aksiaalinen muodonmuutos ϵ_1 oli noin 10 %, vaikka jäännöslujuutta ei ollut saavutettu.

6.2 KOETULOKSET

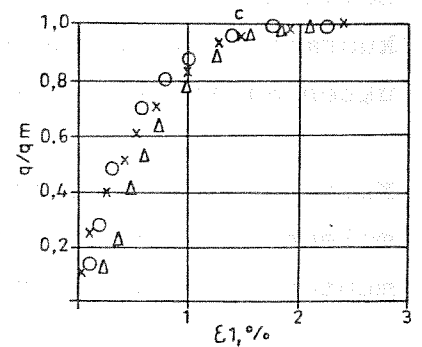
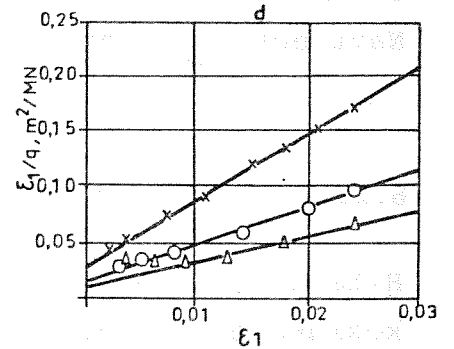
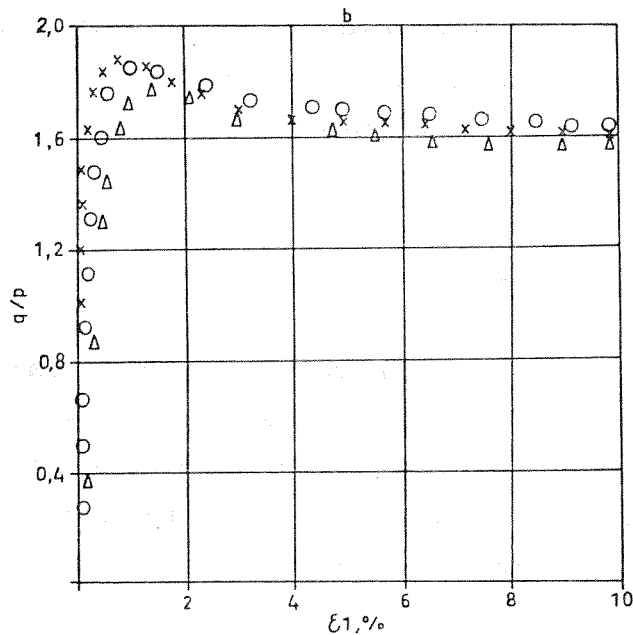
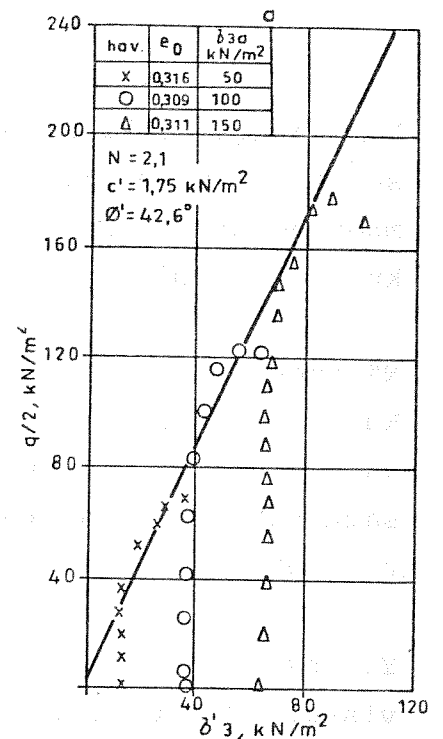
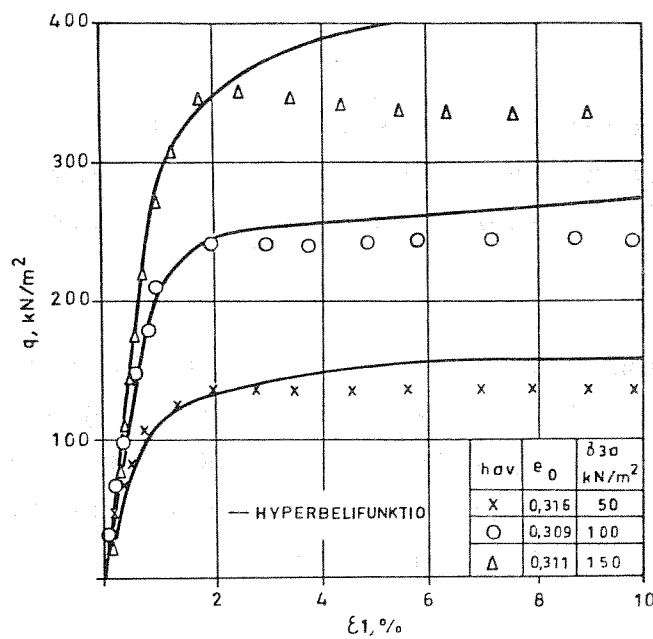
6.21 Konsolidoitu nopea koe eli cu-koe

Näytteet valmistettiin sullomalla, joten ne olivat täysin häiriintyneitä. Säilytyksen avulla yritettiin saavuttaa luonnontilaa vastaavat olosuhteet. Sellipaineen kytkemisen jälkeen näytteeseen annettiin takapaineen vaikuttaa noin vuorokauden ajan. Näytteisiin meni heti takapaineen asennuksen jälkeen paljon vettä. Veden meno taantui vähitellen ja lopuksi näytteisiin meni vain hyvin vähän vettä, kun valitun takapaineen arvo oli saavutettu näytteen molemmissa päissä. Takapaine vaikutti näytteen yläpäähän. Kussakin sarjassa huokosvedenpaineen kehitys takapaineen arvoon tapahtui lähes samanaikaisesti. Huokosvedenpaine tuli jonkin verran suuremmaksi kuin valittu takapaine. Huokosvedenpaine mitattiin näytteen alapäästä. Leikkauksen aikana takapaineventtiili oli suljettuna.

Leikkauksen aikana näytteistä havaittiin kuormitus p , aksiaalinen muodonmuutos ϵ_1 , tilavuudenmuutos ΔV ja huokosvedenpaine u_w .

Tässä julkaisussa esitetään konsolidoiduista nopeista koesarjoista sarja, jonka koekappaleiden tiiviysaste D oli 97,5 % ($e_0=0,310$). Ko. näytteet sullottiin 10 % vesipitoisuudessa. Säilytysaika oli yksi vuorokausi. Tulokset on esitetty kuvassa 23. Jännityspolkukuvioista on saatu kitkakulman ϕ' arvoksi $42,6^\circ$ ja koheesioksi $c' = 1,75 \text{ kN/m}^2$. Murtosuoran yhtälö oli $s' = 1,75 + 0,92\sigma'$. Vesipitoisuus leikkauksen alussa oli noin 10,2 %.

Cu-kokeen täydelliset tulossarjat on julkaistu erikseen (Körkkö 1979). Jäljempänä taulukoissa 7-9 on esitetty yhteenveto suoritetuista cu-kokeista.



σ'_1, σ'_3 tehokkaat pääjännitykset

$q = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3)$ tehokas deviatorinen jännitys

$p = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)$ tehokas hydrostaattinen jännitys

ϵ_1 aksiaalinen muodonmuutos

$q_m = (\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\max}$ puristuslujuus, deviatorisen jännityksen maksimiarvo

e_0 huokosluku

ϵ_{3a} sellipaine leikkauksen aikana

N suoran kulmakerroin

c' tehokas koheesio ($c' = \tau_0 / \sqrt{1 + 2N}$)

ϕ' tehokas kitkakulma ($\tan \phi' = N / \sqrt{1 + 2N}$)

τ_0 murtosuoran ja pystyakselin leikkauspiste

Kuva 23. Kolmiaksaalinen konsolidoitu nopea eli cu -koe Hautaperän moreeni-näytteillä. Säilytysaika 1 vrk, sullontavesipitoisuus $w_0 = 10$ % ja tiiviysaste $D = 97,5$ %.

Leikkauksen aikana huokosvedenpaine aluksi kasvoi, tämän jälkeen se laski jyrkästi. Lopulta huokosvedenpaine alkoi hitaasti vähetä muodonmuutoksen ϵ_1 kasvaessa. Huokosvedenpaine alkoi laskea ennen kuin näyte oli murtunut.

Näytteen tiiviys cu-kokeissa vaikutti selvästi kitkakulman arvoon. Kun tiiviysaste D oli 85 %, oli kitkakulma $\phi' = 30^\circ$. Kun tiiviysaste D oli 97,5 %, oli tällöin kitkakulma $42,6^\circ$. Koheesio vaihteli satunnaisesti eri koesarjoilla riippumatta tiiviysasteesta. Suurin koheesioarvo oli $7,5 \text{ kN/m}^2$ ja pienin nolla.

Yleensä selvää murtopintaa leikkauksen jälkeen ei ollut havaittavissa. Osaltaan tähän vaikutti näytteiden suuri vesipitoisuus. Useimmat näytteet painuivat kokoon, kun ne otettiin pois sellistä. Näytteet häiriintyivät helposti leikkauksen aikana.

6.22 Avoin koe eli d-koe

Hitaana, avoimena kokeena suoritettiin vain yksi näytesarja. Huokosluku e_o oli 0,370 (D=93 %) ja sullontavesipitoisuus w_o oli 0 %. Leikkausnopeus oli noin 0,007 %/min. Leikkauksen aikana havaittiin kuormitus, tilavuudenmuutos ja aksiaalinen muodonmuutos. Leikkauksen aikana ei mitattu näytteessä vallitsevaa ilmanpainetta.

Kolmiakksiaalikohteessa on suhteellinen deformaatio sivusuunnassa molempiin suuntiin yhtä suuri eli $\epsilon_2 = \epsilon_3$. Suhteellinen tilavuudenmuutos ϵ_v on tällöin yhtälön mukainen:

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V_o} \times 100 = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = \epsilon_1 + 2\epsilon_3$$

V_o	alkuperäinen tilavuus
ΔV	tilavuudenmuutos
ϵ_v	suhteellinen tilavuudenmuutos
$\epsilon_1 \dots \epsilon_3$	suhteellisia deformaatioita pääjännitysten suunnissa.

Kun ϵ_v ja ϵ_1 tunnetaan saadaan ϵ_3 ratkaistuksi

$$\epsilon_3 = \frac{\epsilon_v - \epsilon_1}{2}$$

Määritellään uusi suure

$$v = \epsilon_1 - \epsilon_3$$

v deviatorinen muodonmuutos.

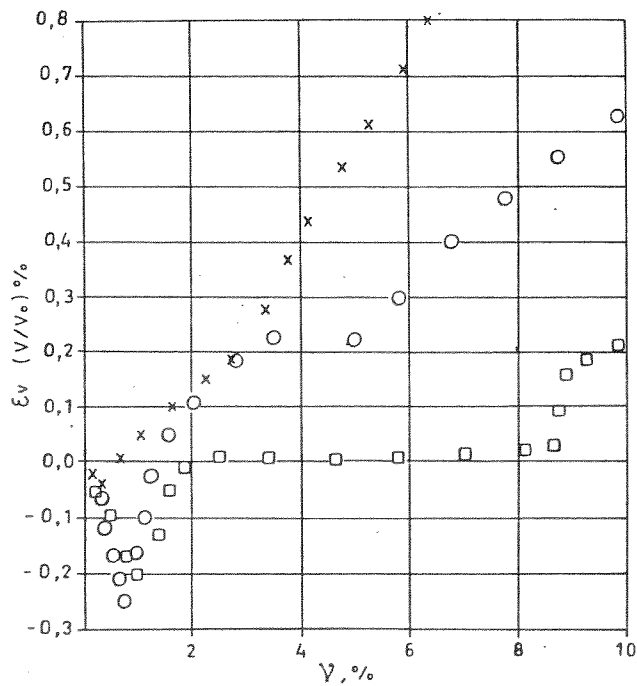
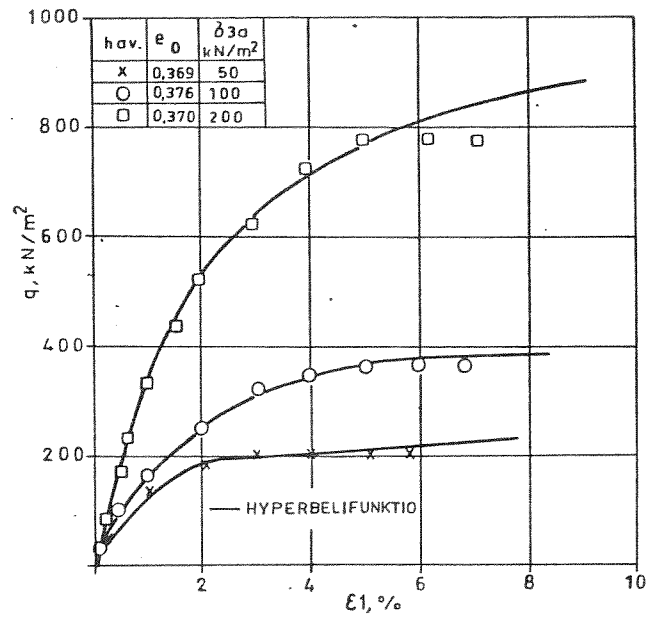
Koetulokset on esitetty kuvissa 24 ja 25. Jännityspolkukuvioista (kuva 25) on kitkakulman ϕ' arvoksi saatu $40,4^\circ$ ja koheesioksi $c' = 2,3 \text{ kN/m}^2$. Murtosuoran yhtälö on tällöin $s' = 2,3 + 0,85 \sigma'$.

6.23 Suljettu nopea koe eli u-koe

Koesarja suoritettiin näytteille, joiden huokosluku e_o oli 0,500 ($D = 85 \%$) ja vesipitoisuus oli noin 10 %.

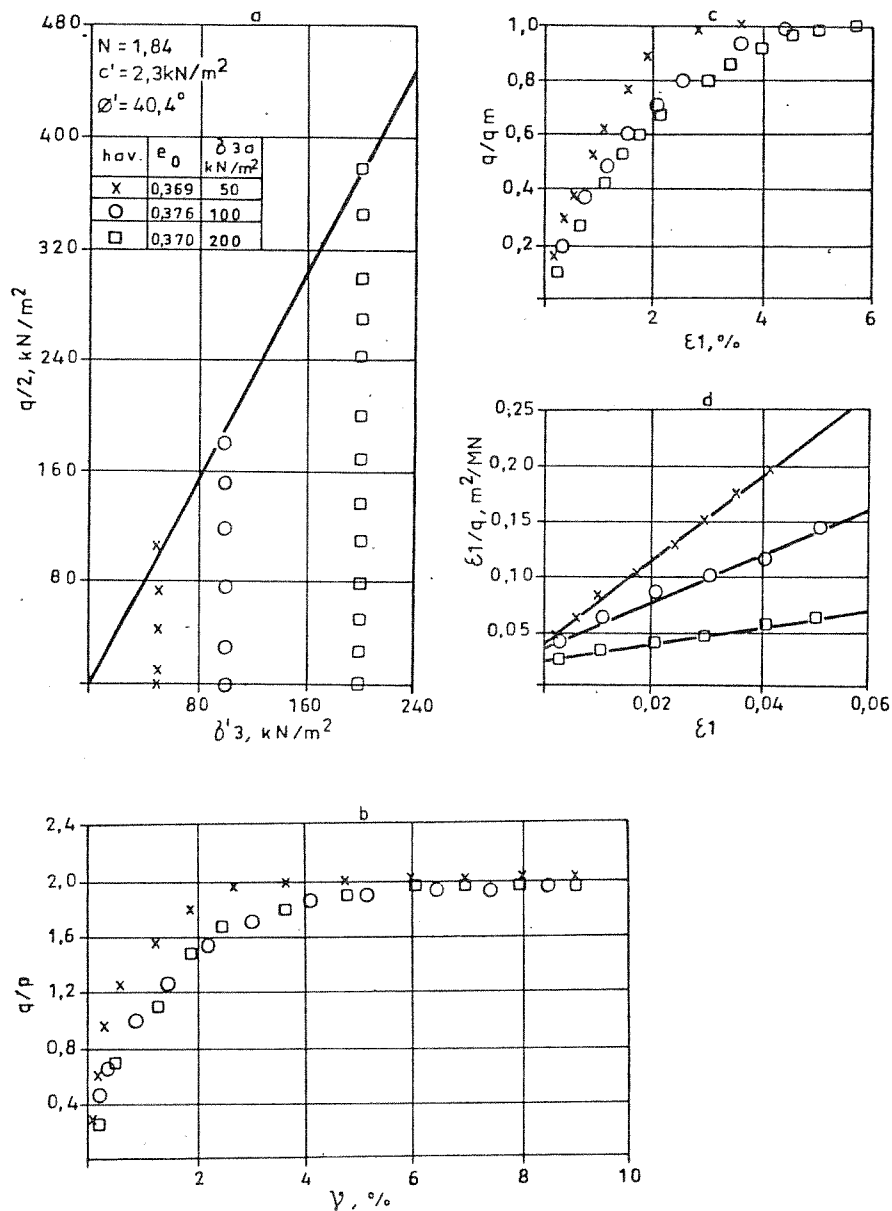
Näytteistä mitattiin huokosvedenpaine näytteen alapäästä ja huokosilmanpaine näytteen yläpäästä. Näytteen alapäässä käytettiin tiivistä huokoskiveä ja näytteen yläpäässä huokoista huokoskiveä, jotta olisi mahdollista mitata huokosilman- ja huokosvedenpaine yhtäaikaan. Lisäksi havaittiin aksiaalinen muodonmuutos ϵ_1 , kuormitus p ja tilavuudenmuutos ΔV .

Nyt mittauksen tuloksena olivat huokosvedenpaineen ja huokosilmanpaineen arvot lähes yhtäsuuret. Leikkauksen aikana näytteen kuormitus p suureni koko ajan. Huokosveden- ja huokosilmanpaine kasvoivat aluksi ja alkoivat tämän jälkeen laskea nopeasti. Tietyn arvon saavutettuaan ne pysyivät lähes vakiona. Tulokset on piirretty seitsemän prosentin kohdalta, jolloin havaittiin, että lujuus kasvoi vähän aksiaaliseen muodonmuutokseen ϵ_1 nähden. Huokosvedenpaineena on käytetty huokosilmanpaineen ja huokosvedenpaineen keskiarvoa. Todettakoon tässä, että jos näytteestä mitataan pelkästään huokosilmanpaineen arvo on koheesioin arvo tavallista suurempi ja jos näytteestä mitataan pelkästään huokosvedenpaine on koheesioin arvo tavallista pienempi (Bishop ja Blight 1963).



e_0	huokosluku
σ_1', σ_3'	tehokkaat pääjännitykset
$q = \sigma_1' - \sigma_3'$	tehokas deviatorinen jännitys
ϵ_1	akσιαalinen muodonmuutos
ϵ_3	muodonmuutos σ_3 -suunnassa
$\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_3$	suhteellinen tilavuudenmuutos
$v = \epsilon_1 - \epsilon_3$	deviatorinen muodonmuutos
σ_{3a}	sellipaine leikkauksen aikana

Kuva 24. Kolmiakσιαalinen avoin eli d-koe Hautaperän moreeni-näytteillä. Sullontavesipitoisuus $w_0 = 0$ % ja tiiviysaste $D = 93$ %.



- σ'_1, σ'_3 tehokkaat pääjännitykset
 $q = \sigma'_1 - \sigma'_3$ tehokas deviatorinen jännitys
 $q_m = (\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\max}$ puristuslujuus, deviatorisen jännityksen maksimiarvo
 $p = \frac{1}{3} (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)$ tehokas hydrostaattinen jännitys
 ϵ_1 aksiaalinen muodonmuutos
 ϵ_3 muodonmuutos σ_3 -suunnassa
 $v = \epsilon_1 - \epsilon_3$ deviatorinen muodonmuutos
 e_0 huokosluku
 σ_{3a} sellipaine leikkauksen alussa
 N suoran kulmakerroin
 c' tehokas koheesio ($c' = \tau_0 / \sqrt{1 + 2N}$)
 ϕ' tehokas kitkakulma ($\tan \phi' = N / \sqrt{1 + 2N}$)
 τ_0 murtosuoran ja pystyakselin leikkauspiste

Kuva 25. Kolmiaksaalinen avoin eli d-koe Hautaperän moreeninäytteillä. Sul-
lontavesipitoisuus $w_0 = 0 \%$ ja tiiviysaste $D = 93 \%$.

Näytteet sisältävät tällöin sekä vettä että ilmaa toisiinsa sekoittuneena. Kuvassa 26 on esitetty tulokset kyseisestä koesarjasta, kun e_o oli 0,500. Kitkakulmaksi on saatu $32,2^\circ$ ja koheesio on ollut nolla. Murtosuoran yhtälö on siten $s' = 0,63 \sigma'$. Tiiviysaste D oli 85 %.

6.3 KOLMIAKSIAALIKOKEIDEN VIRHEET

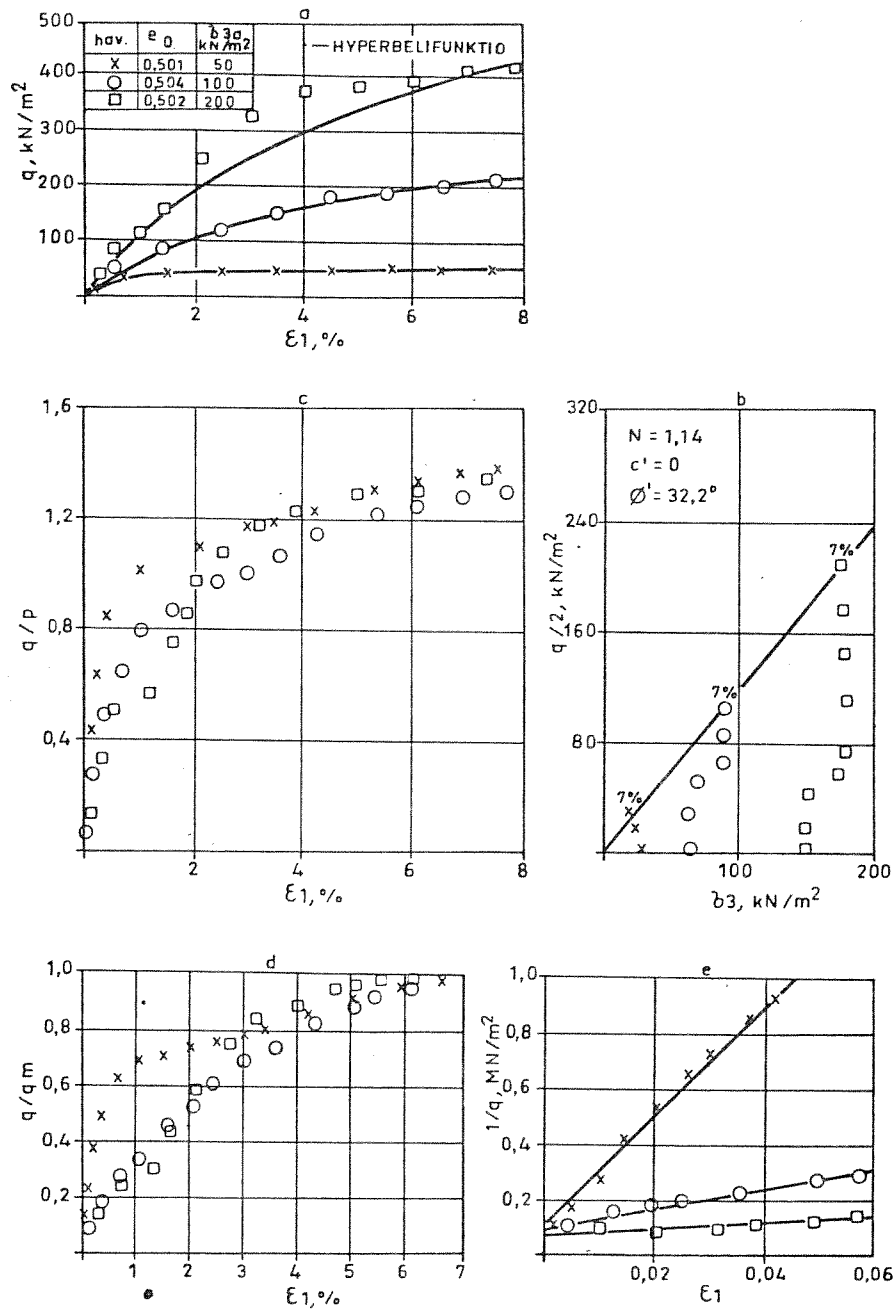
Yleisiä virhetekijöitä ovat näytteiden epähomogeenisuus, huokoskiviin jäänyt ilma, kuormitustankoon vaikuttava kitka, kolmiaksiaalikumin ja näytteen väliin jäänyt ilma, laitteiston epätarkkuudet ja näytteen käsittelyssä tapahtuvat virheet.

Konsolidoidussa nopeassa kokeessa (cu-kokeessa) ei oletettavasti saatu mitätöityä ilman vaikutusta, koska suurin takapaine oli ainoastaan 100 kN/m^2 . Riittävä takapaine kaiken ilman liuottamiseksi näytteistä olisi 210 kN/m^2 (Bishop ja Henkel 1964).

Täten huokosvedenpaineen asemesta mitattiin joko huokosilmanpainetta tai huokosveden- ja huokosilmanpaineen yhteistekijää. Vastaava virhemahdollisuus oli myös suljetussa nopeassa kokeessa. Huokosilman- ja huokosvedenpaineeseen vaikuttaa oleellisesti näytteen laatu, kyllästysaste S_r ja näytteen huokosluku e_o .

6.4 KOETULOSTEN KÄSITTELY

Taulukoihin 7 ja 8 on koottu kaikista koesarjoista saadut tulokset. Taulukoissa esitetään seuraavat näytteiden ominaisuuksia kuvaavat tekijät: menetelmä, tiiviys, huokosluku e_o , sullontavesipitoisuus w_o , sellipaine σ_{3a} , deviatorisen jännityksen maksimiarvo q_m , murtoprosentti ϵ_m , initiaali kimmomoduuli E_i [$E_i = \frac{1}{a_1}$], teoreettinen puristuslujuus q_{ft} ($q_{ft} = \frac{1}{b_3}$), vesipitoisuus w_{ok} ja kyllästysaste S_r leikkauksen alussa ja näytteen säilytysaika (a_1 ja b_3 ovat parametreja).


 σ_1', σ_3'

tehokkaat pääjännitykset

 $q = \sigma_1' - \sigma_3'$

tehokas deviatorinen jännitys

 $q_m = (\sigma_1' - \sigma_3')_{\max}$

puristuslujuus, deviatorisen jännityksen maksimiarvo

 $p = \frac{1}{3} (\sigma_1' + 2\sigma_3')$

tehokas hydrostaattinen jännitys

 ϵ_1

akσιαalinen muodonmuutos

 e_0

huokosluku

 σ_{3a}

sellipaine leikkauksen alussa

 N

suoran kulmakerroin

 c'

tehokas koheesio ($c' = \tau_0 / \sqrt{1 + 2N}$)

 ϕ'

tehokas kitkakulma ($\tan \phi' = N / \sqrt{1 + 2N}$)

 τ_0

murtosuoran ja pystyakselin leikkauspiste

Kuva 26. Kolmiakσιαalinen suljettu nopea eli u-koe Hautaperän moreeninäytteillä. Säilytysaika 1 vrk, sullontavesipitoisuus $w_0 = 10$ % ja tiiviysaste $D = 85$ %.

Taulukko 7. Hautaperän moreenin kolmiaksaalikokeiden mittaustulokset (cu = konsolidoitu nopea koe,
u = suljettu nopea koe).

Mene- telmä	Huokos- luku	Tiiviys- aste (D) %	Sullonta- vesipitoi- suus (w_o) %	Sellipaine leikkauk- sen aikana (σ_{3a}) ² kN/m ²	Deviatori- sen jänni- tyksen mak- simiarvo (σ_{1m}) kN/m ²	Murto- prosentti (ϵ_m) %	Initiaali- kinno- duuli (E_i) kN/m ²	Teoreet- tinen pu- ristus- lujuus (q_{ft}) kN/m ²	Vesipitoi- suus leik- kauksen alussa (w_{ok}) %	Kyllästys- aste (Sr) %	Säily- tys vrk
cu	0,498	85	7,8	50	28	1,9	12500	31	10,7	58,3	1
cu	0,501	85	8,0	100	98	4,6	10000	128	10,4	55,7	1
cu	0,501	85	7,9	150	140	6,0	11100	182	10,5	55,9	1
cu	0,451	87,5	7,9	50	41	2,7	33300	44	10,8	63,6	1
cu	0,463	87,5	7,8	100	57	1,7	20000	70	11,8	68,2	1
cu	0,465	87,5	8,0	150	66	1,9	18200	80	12,8	73,6	1
cu	0,462	87,5	7,7	200	90	2,4	20000	112	12,8	73,3	1
u	0,501	85	9,8	50	53	7,0	9100	53	9,8	50,2	1
u	0,504	85	9,9	100	208	7,0	10500	250	9,9	50,4	1
u	0,502	85	9,8	200	403	7,0	14300	645	9,8	50,1	1
cu	0,379	93	8,2	50	61	6,4	6900	78	11,0	77,7	1
cu	0,381	93	7,8	100	125	2,9	20000	161	11,3	79,2	1
cu	0,371	93	7,8	150	152	2,4	47600	182	11,4	82,0	1
cu	0,368	93	7,9	200	228	1,9	83300	263	11,4	82,8	1
cu	0,368	93	9,9	50	54	8,4	16700	55	11,1	80,5	1
cu	0,372	93	10,0	100	114	9,0	33300	141	11,5	82,4	1
cu	0,372	93	10,0	200	197	10,0	38500	196	11,5	82,4	1
cu	0,373	93	5,0	50	50	1,3	33300	56	11,3	80,9	1

Taulukko 8. Hautaperän moreenin kolmiakssiaalikoikeiden mittaustulokset (cu = konsolidoitu nopea koe, d = avoin koe).

Mene- telmä	Huokos- luku kokeen alus- sa (e_o)	Tiiviys- aste (D) %	Sullonta- vesipitoi- uus (w_o) %	Sellipaine leikkauk- sen aikana (σ_{3a}) ² kN/m ²	Deviatori- sen jänni- tyksen mak- simiarvo (q_m) kN/m ²	Murto- prosentti (ϵ_m) %	Initiaali kimmomo- duuli (E_1) kN/m ²	Teoreet- tinen pu- ristus- lujuus (q_{ft}) ² kN/m ²	Vesipitoi- suus leik- kauksen alus- sa (w_{ok}) %	Kyllästys- aste (Sr) %	Säily- tys vrk
cu	0,374	93	4,9	50	108	4,9	50000	116	8,4	59,9	1
cu	0,371	93	5,0	100	174	13	16000	214	9,6	69,0	1
cu	0,362	93	5,0	150	217	4,6	57000	267	9,9	71,2	1
cu	0,371	93	5,2	200	210	2,4	50000	267	10,8	77,7	1
cu	0,372	93	7,9	50	81	11	20000	83	10,3	73,1	15
cu	0,379	93	8,1	100	128	2,0	36400	152	11,0	77,6	15
cu	0,369	93	7,8	150	195	2,4	45500	250	11,2	81,0	15
cu	0,371	93	7,8	200	174	1,6	55500	232	12,1	86,6	15
cu	0,377	93	8,0	50	90	9,5	26300	90	10,3	73,5	30
cu	0,371	93	7,8	100	138	2,6	50000	161	10,9	78,5	30
cu	0,361	93	7,9	150	175	2,3	50000	208	11,3	81,7	30
cu	0,362	93	8,2	200	231	2,6	40000	313	11,4	83,7	30
d	0,369	93	0	50	203	3,8	26700	256	0	0	0
d	0,376	93	0	100	355	5,3	30800	474	0	0	0
d	0,370	93	0	150	762	5,7	44000	1150	0	0	0
cu	0,316	97,5	10,1	50	136	2,4	35700	167	10,1	85,3	1
cu	0,309	97,5	10,1	100	243	2,4	66700	286	10,1	87,3	1
cu	0,311	97,5	10,5	150	352	2,1	83300	435	10,5	90,1	1
cu	0,312	97,5	10,7	200	373	2,2	133000	455	10,7	91,1	1

Deviatorisen jännityksen q ja deformaation ϵ_1 välistä vuorosuhdetta voidaan approksimoida joissakin tapauksissa hyperbolisella muodonmuutosfunktioilla (Korhonen 1972):

$$q = \frac{\epsilon_1}{a_1 + b_3 \epsilon_1}$$

$q = \sigma'_1 - \sigma'_3$ on tehokas deviatorinen jännitys
 ϵ_1 on muodonmuutos pääjännityksen σ_1 suunnassa
 a_1 ja b_3 ovat parametrejä

Taulukkojen 7 ja 8 mukaan hyperbelifunktion parametrin b_3 käänteisluku ($=q_{ft}$) on joissakin tapauksissa lähes yhtä suuri kuin deviatorisen jännityksen q suurin arvo q_m . Hyperbelifunktion parametrien arvoihin vaikutti osaltaan myös se, että hyperbelifunktion lineaarikoordinaatistossa havaintopisteiden arvot origon läheisyydessä alkoivat jälleen suureta. Tämän vuoksi parametrien a_1 ja b_3 arvot eivät ole täysin luotettavia.

Moreenin lujuusparametrit on koottu taulukkoon 9. Tähän taulukkoon on lisätty myös Oulun yliopiston geotekniikan laboratoriossa saadut tulokset samasta maalajista (Kotakorpi 1979). Kokeet on suoritettu konsolidoituna nopeana kokeena täysin kuivalle maa-ainekselle. Kokeista osa on suoritettu konsolidoituna isotrooppisena nopeana kokeena (=CIDC-kokeena) ja osa konsolidoituna anisotrooppisena nopeana kokeena (=CADC-kokeena). Näissä kokeissa näytteen halkaisija on ollut 7,1 cm ja korkeus 14,2 cm. Ominaispaine γ_s on tällöin ollut 26,3 kN/m³ ja parannetun Proctor-kokeen mukainen maksimikuivatilavuuspaine $\gamma_{dmaks} = 20,86$ kN/m³.

Taulukosta 9 voidaan havaita, että koheesion arvot vaihtelevat säännöttömästi. Koheesion suurin arvo on 7,5 kN/m² ja pienin arvo on nolla. Suurimman arvon suhteen on mahdollista, että huokosvedenpaineen asemesta on mitattu huokosilmanpainetta. Kitkakulmien vaihtelevuus on ollut suuri varsinkin niissä kokeissa, joissa on käytetty takapainetta (cu-kokeet). Saatuja tuloksia verrattaessa Kotakorven vastaaviin tuloksiin voidaan todeta, että niissä vaihtelut ovat olleet huomattavasti pienemmät, mistä päätel-

Taulukko 9. Hautaperän moreenin tehokkaat lujuusparametrit kolmiaksaalikokeilla (c_u = konsolidoitu nopea koe, u = suljettu nopea koe, d = avoin koe, CIDC = konsolidoitu isotrooppinen nopea koe, CADC = konsolidoitu anisotrooppinen nopea koe).

Menetelmä	Tehokas kit- kakulma (ϕ') %	Tehokas ko- heesio (c') kN/m ²	Tiiviysaste (D) %	Huokosluku kokeen alus- sa (e_o)	Vesipitoi- suus leik- kauksen alussa (w_{ok}) %	Maksimikui- vatilavuus- paino (γ_{dmaks}) kN/m ³	Ominaispaino (γ_s) kN/m ³
Körkkö							
cu	30,0	0	85	0,500	10,5	20,48	26,2
cu	23,2	0	87,5	0,460	11,8	"	
u	32,2	0	85	0,500	10,0	"	
cu	34,3	1,6	93	0,370	11,4	"	
cu	37,1	0	93	0,370	11,5	"	
cu	37,6	0,5	93	0,370	11,0	"	
cu	33,5	7,5	93	0,370	11,0	"	
d	40,4	2,3	93	0,370	0	"	
cu	42,6	1,75	97,5	0,310	10,2	"	
Kotakorpi							
CIDC	36,7	0	90	0,430	0	20,86	26,3
CIDC	39,0	1,2	93	0,356	0	"	
CIDC	40,5	0	96	0,313	0	"	
CADC	38,0	1,1	90	0,430	0	"	
CADC	38,5	0,5	93	0,340	0	"	
CADC	41,4	0	96	0,313	0	"	

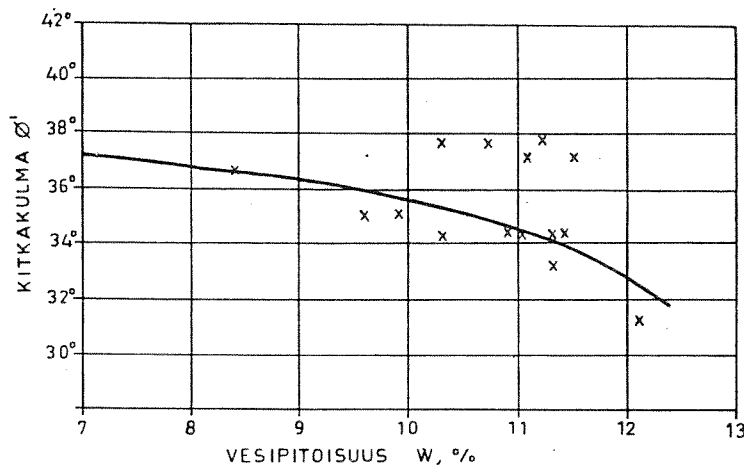
len vesipitoisuus vaikuttaa kitkakulman suuruuteen. Cu-kokeissa takapaineen vaikutuksesta näytteet ovat murtuneet lähes kaikissa tiiviysluokissa samanaikaisesti (taulukot 7 ja 8). Kun vesipitoisuus w_{ok} oli 10 % (u-kokeet) näytteiden lujuus kasvoi jatkuvasti, mutta cu-kokeissa vastaavassa koesarjassa ($e_o = 0,500$ ja $w_{ok} = 10,5$ %) näytteet murtuivat takapaineen vaikutuksesta oletettua aikaisemmin.

Kokeiden perusteella voidaan todeta, että mitä kosteampia näytteet olivat sitä aikaisemmin ne murtuivat. Kun vesipitoisuus oli 12,8 % ($e_o = 0,460$), oli kitkakulman ϕ' suuruus vain $23,2^\circ$. Kun kyseisen sarjan näytteet otettiin pois sellistä, ne olivat selvästi häiriintyneitä ja painuivat nopeasti kokoon. Tuloksia ei voi pitää täysin luotettavina, koska havaintoja oli vain kaksi.

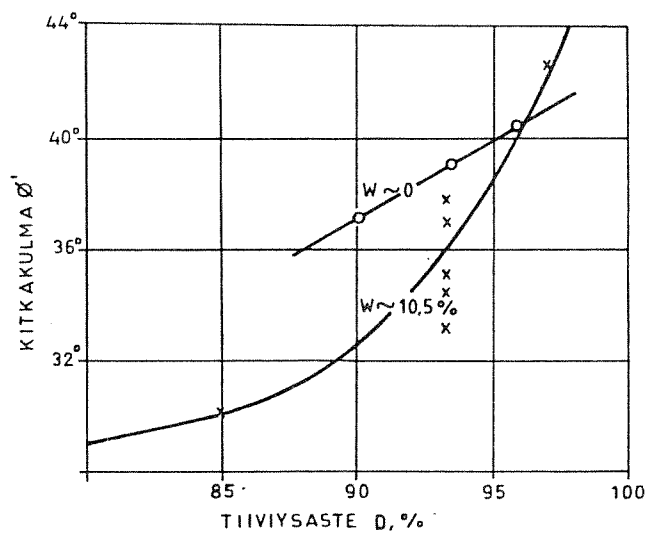
Kuvaan 27 on esitetty kitkakulman ϕ' riippuvuus vesipitoisuudesta, kun tiiviysaste D on ollut 93 % ($e_o = 0,370$). Kuvasta voidaan havaita, että kitkakulman ϕ' arvo pienenee, kun näytteen vesipitoisuus kasvaa. Alussa pieneneminen on hidasta, mutta käyrä alkaa laskea jyrkästi, kun vesipitoisuus ylittää 12 %. Täten valvontaan on kiinnitettävä erityistä huomiota, ettei kyseinen moreeni ole liian kostea tehtäessä maarakenteita.

Kitkakulman ja tiiviysasteen riippuvuus toisistaan tietyissä vesipitoisuuksissa on esitetty kuvassa 28. Kun vesipitoisuus on ollut nolla (Kotakorven tulokset) on riippuvuus ollut kitkakulman ϕ' ja tiiviysasteen D välillä suoraviivainen. Kun vesipitoisuus on ollut yli 10 % on kitkakulman vaihtelu ollut huomattavasti suurempi. Kummassakin tapauksessa tulokset ovat konsolidoidusta isotrooppisesta nopeasta kokeesta (ts. tässä tutkimuksessa cu=CIDC). Tiiviysasteella on tutkimuksen mukaan suuri merkitys rakennettaessa maarakenteita. Tämän vuoksi on valvontaan kiinnitettävä erityistä huomiota, jotta suunniteltu tiiviysaste D saavutetaan.

Tiiviyyden vaikutus pohjarakennusohjeiden mukaan on $\pm 4^\circ$. Suurin arvo oli tässä tutkimuksessa $42,6^\circ$ ($D = 97,5$ % ja $w_{ok} = 10,2$ %) ja pienin $23,2^\circ$ ($D = 87,5$ % ja $w_{ok} = 11,8$ %). Suuret vaihtelut kitkakulman ϕ' arvoissa johtuvat vesipitoisuuksien erilaisuudesta ja ko. moreenin suuresta häiriintymisherkkyydestä. Tuloksia ei voi pitää täysin luotettavina vaan suuntaa-antavina.



Kuva 27. Hautaperän moreenin tehokkaan kitkakulman ϕ' riippuvuus vesipitoisuudesta w , kun tiiviysaste $D = 93\%$. Vesipitoisuudet kolmiaksiaalikohteiden leikkauksen alussa (cu-kokeet).



Kuva 28. Hautaperän moreenin tehokkaan kitkakulman ϕ' riippuvuus tiiviysasteesta D vesipitoisuuksilla $w = 10,5\%$ ja $w = 0\%$ (suora $w = 0$ Kotakorpi 1979). Vesipitoisuudet kolmiaksiaalikohteiden leikkauksen alussa (cu-kokeet).

Tutkittaessa vaikuttiko näytteiden säilytysaika moreenin lujuusparametreihin, voidaan todeta, että ei vaikuttanut. Säilytysajat olivat 1 vrk, 2 vk ja 1 kk. Näytteiden huokosluku e_0 oli 0,370 ($D=93\%$). Suurin kitkakulma ϕ' oli $37,6^\circ$ näytteillä, joiden säilytysaika oli kaksi viikkoa. Suurin koheesio c' oli $7,5 \text{ kN/m}^2$ näytteillä, joiden säilytysaika oli yksi kuukausi. Tulokset ilmevät taulukosta 9. Takapaineen käytön vuoksi näiden koesarjojen näytteiden vesipitoisuudet leikkauksen alussa eivät olleet täysin samat. Vaihtelut lujuusparametreissa johtuivat osaltaan tästä.

Tutkimusta voidaan täydentää suurilla sellipaineilla ja suurilla takapaineilla, jotta saataisiin selville antavatko pienet takapaineet virhellisiä tuloksia. Sellipainetta voidaan nostaa asteittain, jotta huokosvedenpaineenkertoimista voidaan päätellä onko näyte täysin vedellä kyllästynyt.

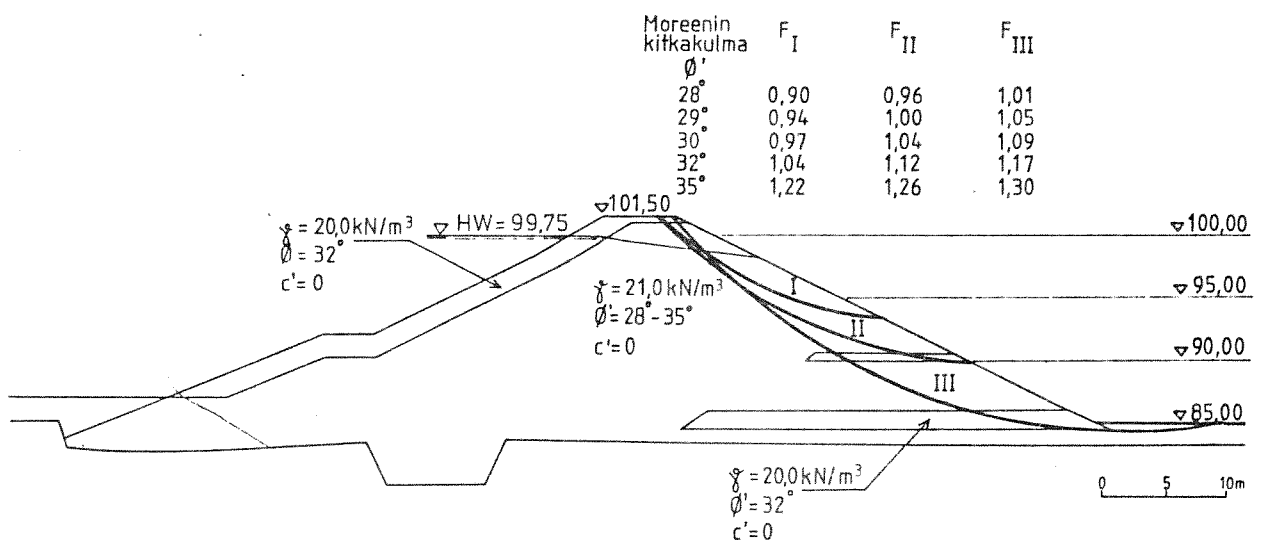
7. VAKAVUUSLASKELMAT

Padon vakavuus on laskettu $c' - \phi'$ -menetelmällä käyttäen A. W. Bishopin (1954) kehittämää laskentakaavoja. Laskenta ja siihen liittynyt vaarallisimman liukupinnan etsiminen on suoritettu vesihallituksen teknillisessä tutkimustoimistossa käytössä olevan ohjelmiston avulla. Huokosvesipaine arvot on saatu edellä esitetyistä ekvipotentiaaliviivoista (kuva 18). Patomateriaalin koheesio on otettu laskelmissa nolllaksi. Patomateriaalin kitkakulmale on käytetty arvoja 35° , 32° , 29° ja 28° astetta. Laskelmat on suoritettu padon alkuperäisen rakentamisen jälkeiselle ja eri korjausvaiheiden jälkeisille tilanteille erikseen. Laskelmien tuloksina saadut varmuuskertoimet on esitetty kuvissa 29-31. Kitkakulman arvo $\phi' = 35^\circ$ vastaa edellä esitettyjen lujuustutkimusten ja työnaikaisten tarkkailutulosten mukaan varovaisesti määrättyä keskiarvoa ja arvot 29° ja 28° vesipitoisuudeltaan suurimpia ja tiiviistysasteeltaan heikoimpia rakenteen osia.

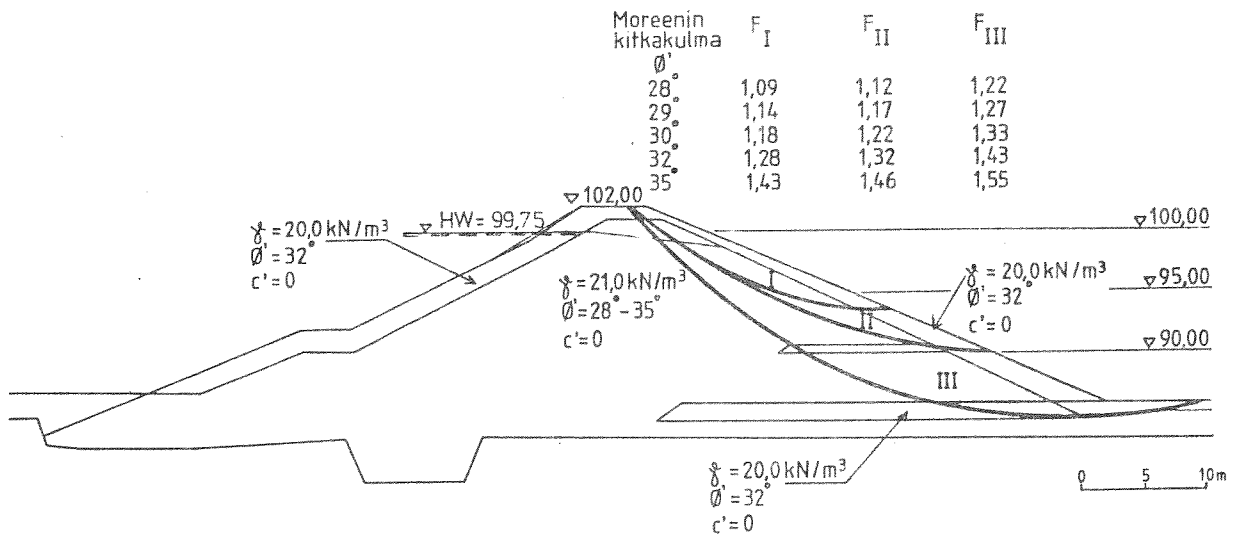
Laskentatulosten mukaan alkuperäisen rakennustyön jälkeisessä tilanteessa padon kuivan puolen yläluiskan varmuuskerroin on noin 1.0. Ko. liukupinta vastaa luiskassa tapahtunutta sortumaa. Em.

määrityksestä saadaan hyvä lähtökohta arvioitaessa korjaustyön vaikutusta.

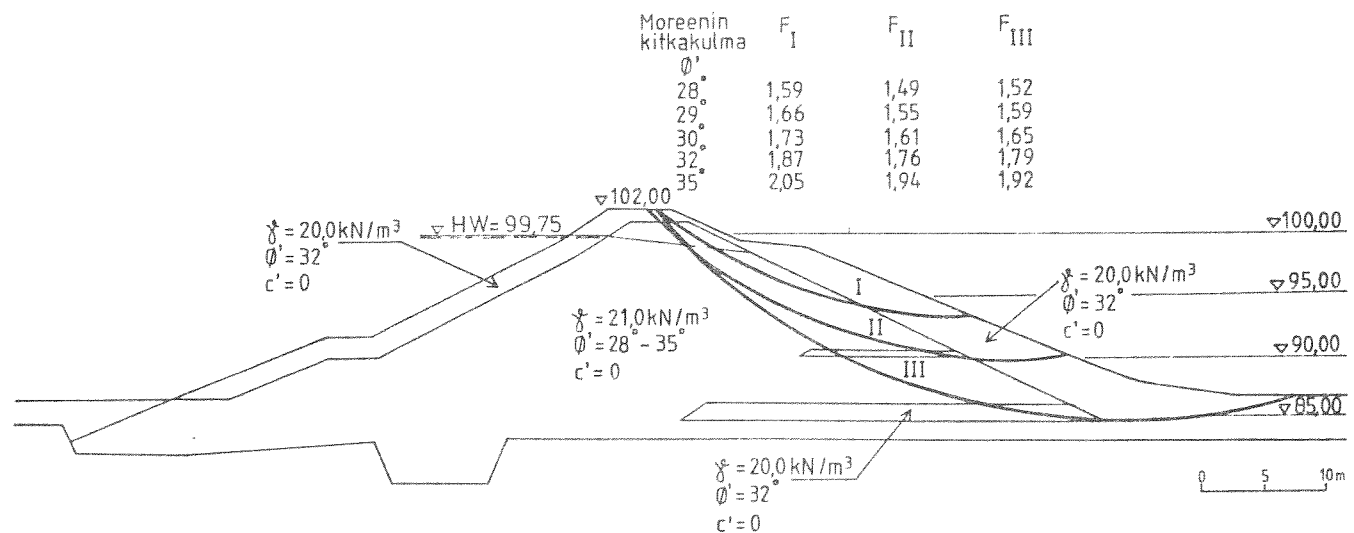
Ensimmäisen korjausvaiheen jälkeinen vakavuus on selvästi alkuperäistä parempi, mutta varmuuskertoimet ovat hiukan vaadittua ($F = 1,5$) pienempiä varsinkin keskimääräistä pienemmillä lujuusarvoilla laskettuna. Viimeisen korjausvaiheen jälkeiset varmuuskertoimet täyttävät keskimääräisillä lujuusarvoilla asetettavan vaatimuksen jopa heikoimmilla arvoilla laskettuna.



Kuva 29. Hautaperän maapadon varmuuskertoimet ($F_I - F_{III}$) paalulla 8+47 ennen kuivan luiskan vahvistuksia. Huokosvesipaineet kuvasta 18.



Kuva 30. Hautaperän maapadon varmuuskertoimet ($F_I - F_{III}$) paalulla 8+47 kuivan luiskan soravahvistuksen (kesällä 1976) jälkeen. Huokosvesipaineet kuvasta 18.



Kuva 31. Hautaperän maapadon varmuuskertoimet ($F_I - F_{III}$) paalulla 8+47 kuivan luiskan lisävahvistuksen (kesällä 1977) jälkeen. Huokosvesipaineet kuvasta 18.

8. JOHTOPÄÄTÖKSET SUORITETUISTA SELVITYKSISTÄ

Patojen suunnittelussa on huomioitava rakennusmateriaalin lujuuden ja vedenläpäisevyyden vaihtelu sekä vedenläpäisevyyden eroavaisuus pysty- ja vaakasuunnissa.

Homogeenisten patotyyppien osalta on erittäin tärkeää seurata materiaalin vedenläpäisevyyden vaihtelua ja välttää läpäisevämpiä kerroksia rakenteen yläosassa. Suuremmissa patorakenteissa on suositeltavaa varmistaa läpi suotautuvan veden johtaminen kuivatusjärjestelmiin pystyn tai vinon suodattimen avulla.

Rakentamisen valvontaa on tehostettava siten, että rakennustyön aikana on mahdollista seurata padon suotovesisuhteitten muotoutumista. Tarvittaessa on työn aikana tarkistettava suunnitelma ja tehtävä muutokset, joilla vältetään huonot suotovesisuhdetilanteet.

Lujuuden vaihtelua seurataan rakentamisen aikana vesipitoisuuden ja tiiviysasteen tarkkailulla. Mikäli suunnitelmassa esitettyjä vaatimuksia ei pystytä noudattamaan on selvitettävä muuttuneen tilanteen vaikutukset patorakenteen mitoitukseen.

Vedenläpäisevyyden ja lujuuden vaihtelua on selvitettävä myös ennakkokokeina materiaalin ottopaikoilla. Sullontatyön käytännön järjestelyihin on myös kiinnitettävä erityistä huomiota. On vältettävä materiaalin lajittumista sullontatyön aikana ja tarkkailtava tiivistystyön suoritusta annettujen ohjeiden mukaisesti.

Rakentamisen jälkeen on suoritettava tarkistuslaskelmat rakenteen suotovesisuhteista ja vakavuudesta. Tarkistuslaskelmien avulla suunnitellaan padon tarkkailumittaukset. Tarkkailua varten määritetään eri mittausarvojen normaalit arvot ja vaatimusrajat. Jatkuvan tarkkailun intensiivisyys määritetään saatujen tarkkailutulosten perusteella.

Selvitysten mukaan Hautaperän maapato täyttää padoille yleisesti asetettavat varmuusvaatimukset. Vesipainesuhteiden vaihtelua seurataan suotovesimäärän ja pohjavesitason tarkkailulla.

9. TIIIVISTELMÄ

Hautaperän pato rakennettiin vuosina 1971-1976 ja allas täytettiin ensimmäistä kertaa keväällä 1976. Padossa tapahtui sortumia kesällä 1976, minkä jälkeen patoa vahvistettiin välittömästi kuivan luiskan soraverhouksella sekä vuonna 1977 toisen kerran kuivan luiskan moreeni- ja sorakerroksilla.

Julkaisussa on käsitelty Hautaperän maapadon suunnittelua, rakentamista, rakentamisen jälkeen tehtyjä tarkkailumittauksia, padon suotovesisuhteita ja runkomateriaalina käytetyn moreenin kolmiaksiaalikokeita sekä padon vakavuuksia.

Padon ominaisuudet työn aikana tehtyjen kokeiden perusteella on selvitetty maapatotyön valvontarekisterin avulla. Patotyön laatu- arvioimiseksi on laskettu eri ominaisuuksien (rakeisuus, vesipitoisuus, optimivesipitoisuus, vedenläpäisevyys kenttä- ja laboratorioskokeilla sekä tiiviysaste) vaihtelu moreenirungon osalta.

Padon ominaisuuksista rakentamisen jälkeen on käsitelty huokos- vedenpaineenmittauksia, routahavaintoja, suotovesimääriä sekä vedenläpäisevyyskokeita padossa olevien huokosvesiputkien avulla.

Padon suotovirtausta tutkittiin elementtimenetelmään perustuval- la tietokoneohjelmalla, jolloin pyrittiin pääsemään mahdollisim- man lähelle havaintojen perusteella arvioitua tilannetta vaihte- lemalla vedenläpäisevyyskertoimien suhteita.

Kolmiaksiaalikokeilla selvitettiin moreenirunkoon käytetyn mate- riaalin lujuusominaisuuksia eri vesipitoisuuksilla ja tiiviys- sillä.

Vakavuuslaskelmilla selvitettiin padon vakavuudet ennen vahvis- tustöitä, vahvistustöiden ensimmäisen vaiheen jälkeen sekä lo- pullinen vakavuus. Padon varmuuden voitiin todeta täyttävän pa- doille yleisesti asetettavat vaatimukset.

S A M M A N D R A G

Dammen vid Hautaperä byggdes under åren 1971-1976 och bassängen fylldes för första gången våren 1976. I dammen förekom ras sommaren 1976, varefter dammen omedelbart förstärktes genom att täcka den torra slänten med grus och för andra gången år 1977 med morän- och gruslager på den torra slänten.

I publikationen har behandlats planeringen och byggandet av Hautaperä jorddamm, kontrollmätningarna efter byggandet, dammens genomsippringsförhållanden och triaxialförsök av den morän, som använts som stommaterial samt dammens stabilitet.

Dammens egenskaper på basen av försök som gjorts under arbetets gång har utretts med hjälp av ett kontrollregister för jorddammsarbetet. För att uppskatta dammarbetets kvalitetsnivå har de olika egenskapernas (kornighet, vattenhalt, optimal vattenhalt, genomsläpplighet för vatten med fält- och laboratorieförsök samt packningsgrad) variation för moränstommens del uträknats.

Av dammens egenskaper efter byggandet har behandlats mätningarna av porvattentrycket, tjälobservationer, mängderna genomsippringsvatten samt försöken med vattnets genomsläpplighet med hjälp av porvattenrören i dammen.

Dammens genomsippring undersöktes med ett dataprogram baserat på elementmetoden, varvid man strävade till att nå så nära som möjligt den situation, som hade uppskattats på basen av observationerna, genom att variera förhållandena mellan koefficienterna för vattengenomsläpplighet.

Med triaxialförsök klarlades det till moränstommen använda materialets hållfasthetsegenskaper vid olika vattenhalter och tätheter.

Med stabilitetskalkyler klarlades dammens stabilitet före förstärkningsarbetena, efter förstärkningsarbetenas första skede samt den slutliga stabiliteten. Dammens säkerhet kunde konstateras fylla de allmänna kraven, som uppställdes på dammar.

K I R J A L L I S U U S L U E T T E L O

- Aalto, J. Geotekniikan numeeriset menetelmät. Helsingin teknillinen korkeakoulu, luennot 1974. Julkaisematon.
- Bishop, A. W. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. Geotechnique, Vol. V, No. 1, p. 7. The Institution of Civil Engineers. London 1954.
- Bishop, A. W. and Blight, G. E. Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partly Saturated Soils. Geotechnique, Vol. XIII No. 3, pp. 177-197. The Institution of Civil Engineers. London 1963.
- Bishop, A. W. and Henkel, D. J. The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test. London 1964.
- Cedergren, H. R. Seepage, Drainage and Flow Nets. John Wiley & Sons. USA 1967.
- Cedergren, H. R. Use of Flow Net In Earth Dam and Levee Design. Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. 5, p. 238. Rotterdam 1948.
- Harr, M. E. Groundwater and Seepage. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York 1962.
- Korhonen, K-H. Maalajien muodonmuutoksista. Valtion teknillinen tutkimuslaitos. Tiedotus. Sarja III-Rakennus 169. Helsinki 1972.
- Kotakorpi, J. Hiekan ja moreenin deformatuminen stokastisena prosessina. Diplomityö. Oulun yliopisto. Oulu 1979.
- Körkkö, R. Hautaperän moreenin mekaaniset ominaisuudet. Diplomityö. Oulun yliopisto. Oulu 1979.

Loukola, E. The Use of Control Test Data in the Calculation of Dam Safety. 13th International Congress on Large Dams. Transactions Volume III. New Delhi 1979.

Maijala, T. Hautaperän maapadon suotovirtauksista. Diplomityö. Oulun yliopisto. Oulu 1978.

Schuurman, E. The Compressibility of an Air/Water Mixture and Theoretical Relation between the Air and Water Pressures. Geotechnique, Vol. XVI, No. 4, pp. 269-281. The Institution of Civil Engineers. London 1966.

Terzaghi, K. Theoretical Soil Mechanics. J. Wiley & Sons. New York 1943.